

## 함정 가동률 최대화를 위한 선석할당문제

원현식<sup>1</sup> · 안태호<sup>2</sup> · 이상현<sup>3\*</sup>

### A Berth Allocation Problem to Maximize the Available Rate of Naval Vessels

Hyunsik Won · Ahntae Ho · Sangheon Lee

#### ABSTRACT

This paper addresses the berth allocation problem in naval ports. Navy vessels need various services such as emergency repair, missile loading, oil supply and many others while commercial vessels only unload and load container at the port. Furthermore, naval vessels have to shift frequently due to a limited capacity of the port. The objective of this paper is to minimize the total number of nesting vessels at the naval port. In other word, the objective is to maximize the total number of naval battleships engaging in the sea. A mixed integer programming(MIP) model is developed and experiments are conducted with ILOG CPLEX 11.0. We compare the computational results of the MIP model to the current scheduling approach by the ROK Navy. The results showed that MIP model performed well by minimizing the number of nesting vessels. and avoiding unnecessary shifts.

**Key words** : Berth allocation, Available rate, MIP, Naval vessels, Naval port

#### 요약

본 논문은 군항에서의 선석할당문제(BAP)를 다루고 있다. 일반적으로 민간선박이 컨테이너 부두에서 컨테이너 적·하역 작업을 주로 하는 반면에 해군함정은 긴급수리, 무장적재, 유류수급 등 다양한 서비스를 필요로 한다. 또한 해군함정은 제한된 부두의 능력과 설비 때문에 민항에선 거의 일어나지 않는 잦은 선석이동을 해야 한다. 본 연구의 목적은 전시상황 하에서 여러 해군함정이 필요한 서비스를 받기 위해 부두에 입항 시 입항하는 모든 함정이 최단시간 내 요구 서비스를 모두 마치고 다시 전비태세를 유지토록 서비스 완료시간을 최소화하는 것이다. 즉, 부두에 계류중인 함정 수의 최소화를 통하여 해상에서 교전 가능한 함정의 수를 최대화하는 것이다. 제시된 문제를 해결하기 위해 혼합정수계획법(MIP)으로 수리모형을 작성하였고 ILOG CPLEX 11.0을 이용해서 최적해를 산출하였다. 연구결과는 수리모형에 의한 선석할당이 불필요한 선석이동을 최소화하고 전 시 교전에 참가할 수 있는 함정 수를 더 증가시킬 수 있다는 결과를 나타낸다.

**주요어** : 선석할당문제, 가동률, 혼합정수계획법, 해군함정, 군항

## 1. 서론

선석할당이란 항구에 입항이 기계화된 선박을 필요 서비스를 수행하기에 적합한 선석에 할당하는 것이다. 이때 할

당조건의 고려사항은 선석의 개수와 길이, 정박기간과 선박의 척수와 길이, 계류시간, 화물의 종류 등을 의미한다<sup>[1]</sup>.

선석할당 문제는 민항의 경우 다양한 방법으로 연구되어 왔고 지금도 활발히 연구되고 있다. 그러나 군항에서의 선석할당은 민항에서의 선석할당과 다소 큰 차이가 있다. 민항의 경우 통상 컨테이너 터미널 이용에 따라 출항 지연 벌금(penalty) 최소화, 선석의 활용도를 높이기 위해 선박이 차지하는 선석의 총길이 최소화 또는 선박의 서비스 시간과 대기시간 최소화 등의 척도(measure)가 있으며 민항 선박은 컨테이너 적·하역을 모두 마칠 때까지 통상 선석이동을 하지 않는다<sup>[2]</sup>. 반면 군항에서의 함정은 요구

2009년 1월 12일 접수, 2009년 3월 19일 채택

<sup>1)</sup> 해군 제1함대사령부  
<sup>2)</sup> 숭실대학교 경영학부  
<sup>3)</sup> 국방대학교 운영분석학과  
주 저 자 : 원현식  
교신저자 : 이상현  
E-mail: leesangh@kndu.ac.kr

되는 다양한 서비스를 받기 위해 잦은 선석이동을 요구하는 실정이다.

군항에서는 선석이용 비용의 최소화보다는 얼마나 효과적으로 선석을 할당하여 함정이 원하는 요구사항을 달성하는 것이 주된 목적이다. 컨테이너 적·하역이 주 작업인 민항과는 달리 군항은 차기 임무를 수행하기 위해 필요한 서비스를 받는 것이 군항 내에서 이루어지는 주 작업이다. 해군함정은 모든 작전이나 훈련을 마치면 반드시 모항으로 귀항해 다음 임무를 대비하게 된다. 전시에는 함정의 파손이나 무장, 유류, 부식 등 임무수행에 필요한 자원을 보충하기 위해 모항으로 입항하게 된다. 군항 내 선석은 함정이 필요로 하는 모든 서비스를 일괄적으로 제공하는 대신 선석의 특성에 따라 각기 다른 서비스를 한정적으로 지원 가능하기 때문에 각 함정별 서비스 소요시간, 함정의 특성, 함정이 필요로 하는 서비스, 선석의 특성, 선석의 지원 가능한 서비스 등의 여러 가지 실제상황을 고려하여 각각의 함정이 모항에 머무르는 기간 동안 필요한 서비스를 지연 없이 지원받도록 선석을 할당해야 한다.

본 연구의 목적은 전시 해군함정이 해상에서 교전 중 자함에 요구되는 서비스를 받기 위해 모항에 귀항 시 최단시간 내 필요한 서비스를 마치고 다시 전장에 투입하기 위해 효과적인 선석할당을 통해 부두에 계류 중인 함정의 수를 최소화하는 것이다. 다시 말해서, 부두에 계류 중인 함정 수의 최소화를 통하여 해상에서 교전 가능한 함정의 수를 최대화하는 것이 목적이다.

## 2. 관련연구

### 2.1 민항 선석할당 문제

Lim<sup>[2]</sup>은 선석이 나누어진 구역의 집합이 아닌 연속된 공간이라고 제시하고 선석계획문제를 시간과 선석길이의 2차원 패킹문제로 표현하였다. 목적식은 모든 선박이 차지하는 선석의 총 길이의 최소화이다.

홍동희<sup>[3]</sup>는 유전자 알고리즘과 시뮬레이션을 통해 터미널에서의 선석계획과 야드설계의 통합에 대해 연구하였다. 정다훈 *et al.*<sup>[4]</sup>은 일반부두와 양현부두의 본선작업 완료시간 비교를 위해 GRASP(greedy randomized adaptive search procedure) 기법을 적용한 안벽크레인 일정계획 알고리즘을 연구한 바 있다.

Wang *et al.*<sup>[5]</sup>은 선석할당 문제에 대한 새로운 다 국면(multiple stage) 탐색기법으로 확률적 빔 탐색 알고리즘(stochastic beam search algorithm)을 개발하였다. Imai *et al.*<sup>[6]</sup>은 메가-컨테이너선박의 빠른 서비스를 위해 다중 사

용자 컨테이너 터미널에서의 선석할당에 대해 연구하였다. 이를 위해 정수계획법과 유전자 알고리즘을 활용하였다. Hansen *et al.*<sup>[7]</sup>은 선석할당에 있어서의 비용 최소화를 위해 다중 이웃탐색(variable neighborhood search) 기법을 개발하여 기존 해법의 결과와 비교한 바 있다.

### 2.2 군항 선석할당 문제

Brown *et al.*<sup>[8]</sup>은 해군함정이 선석에 머무르는 기간 동안 요구되는 서비스를 가능한 선석에서 받음으로써 서비스를 점수화한 총점을 최대화하는 방법을 제시하였다. 또한, 선석이동으로 인한 함정의 선석이동 별점과 필요한 서비스를 받지 못함으로써 야기되는 별점의 최소화 제약식을 추가하는 혼합정수계획 모형을 수립하여 문제를 해결하였다. 이득점수(benefit)는 미래보다는 현재를 더 중요하게 반영하고 있으며 서비스를 받지 못하고 부두에 머무르는 동안 시간이 경과 할수록 점수는 차감된다.

정환식 등<sup>[1]</sup>은 해군함정이 각종 훈련, 경비임무를 수행한 후 모항에 머무르는 기간 동안 차기 임무를 준비하기 위해 구비해야 할 서비스를 우선순위와 전후관계를 취급하는 선석할당문제를 연구하였다. Brown *et al.*<sup>[8]</sup> 모형에 서비스의 시간적 제약조건과 전후 우선순위가 존립하는 해군의 보다 현실적인 상황을 추가한 선석할당 모형을 제시한 바 있다.

## 3. 함정 가동률 최대화 모형

### 3.1 문제 정의

해군함정의 임무수행을 위한 활동공간은 해상이며 함정들의 임무수행에 필요한 자원을 보충하는 곳은 항구이다. 본 연구는 전시 해군함정이 해상에서 교전 중 각 함정별 필요한 서비스를 받기 위해 모항에 귀항 시 최단 시간 내 전장에 재투입할 수 있도록 정해진 입항기간 중 필요한 서비스를 효율적인 선석할당을 통해 신속히 마치고 부두에 잔류하는 함정의 수를 최소화하는 것이다. 이를 다르게 표현하면, 해상에서 교전할 수 있는 함정의 수를 최대화하는 문제이다.

### 3.2 가정 사항

선석할당 문제의 모형을 구성하는데 필요한 가정 사항은 다음과 같다.

- 1) 각 선석의 길이는 모든 함정이 계류할 수 있는 충분한 길이를 확보하고 있다.
- 2) 각 선석의 수심은 모든 함정이 계류할 수 있을 정도

- 로 충분히 깊다.
- 3) 각 선석은 함정 3척이 계류할 수 있는 전원 케이블 공급이 가능하다.
  - 4) 한 함정은 부두에서 두 개 이상의 선석을 차지할 수 없다.
  - 5) 무장작업을 하는 함정은 단독계류를 한다.
  - 6) 길이가 짧은 함정은 긴 함정 외측에 계류한다.
  - 7) 함정 계류순서는 내측부터 순차적으로 계류한다.
  - 8) 예정기간보다 일찍 서비스가 종료되면 바로 출항 할 수 있다.
  - 9) 서비스는 여러 서비스를 동시에 받을 수 없고 하나 씩 받을 수 있다.
  - 10) 선석이동은 하루 중 오전, 오후 총 2회 할 수 있다.

### 3.3 모형 구축

함정 가동률은 총 함정 수에서 모형에서 서비스 받는 함정 수를 제외한 가동함정 수를 백분율로 나타내며 항내에서 서비스를 받는 함정 수를 최소화함으로써 함정 가동률을 최대화 할 수 있다. 함정 가동률 최대화를 위한 필요한 변수와 수리모형은 다음과 같다.

[기호]

- $i = 1, \dots, I$  : 함정(ships)
- $j = 1, \dots, J$  : 선석(piers)
- $k = 1, \dots, K$  : 일자(period)
- $s = 1, \dots, S$  : 서비스(services)
- $a = 1, \dots, A$  : 함정/부두의 특성(입항일, ...)

[상수변수]

- $SA_{ia}$  : 함정  $i$ 의 특성  $a$ (power:전원 케이블 수, firstday:입항일, lastday:출항하기 전 일)
- $PA_{ja}$  : 선석  $j$ 의 특성  $a$ (housing:함정 수용능력, power:전원 케이블 수)
- $SQT_{is}$  : 함정  $i$ 가 요구하는 서비스  $s$ 의 소요시간
- NONEST : 단독계류를 해야 하는 함정들
- MP : 무장선석(Missile Pier)의 집합
- $P(s)$  : 서비스  $s$ 를 제공하는 부두들의 집합
- $SQ_{is}$  : 함정  $i$ 가 서비스  $s$ 를 필요로 하면 1, 아니면 0
- $PQ_{js}$  : 선석  $j$ 가 서비스  $s$ 를 지원 가능하면 1, 아니면 0

[결정변수]

- $Y_{ijk}$  : 함정  $i$ 가 선석  $j$ 로 일자  $k$ 에 계류하면 1, 아니면 0

- $Z_{is}$  : 함정  $i$ 가 서비스  $s$ 를 받지 못하면 1, 아니면 0
- $M_{ijk}$  : 함정  $i$ 가 선석  $j$ 로 일자  $k$ 에 선석이동하면 1, 아니면 0

[수리모형]

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{ijk} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^J Y_{ijk} = 1 \quad \forall i, k \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I Y_{ijk} \leq 3 \quad \forall j, k \quad (3)$$

$$(SA_{i,firstday} - 1) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{ijk} \leq SA_{i,lastday} \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{ijk} \geq \sum_{s=1}^S SQT_{is} SQ_{is} \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^S SQT_{is} SQ_{is} + \sum_{s=1}^S Z_{is} \geq \sum_{k=1}^K Y_{ijk} \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$\sum_{k=SA_{i,lastday}+1}^K Y_{ijk} = \sum_{k=1}^{SA_{i,firstday}-1} Y_{ijk} = 0 \quad \forall i, j \quad (7)$$

$$\sum_{j \in P(s)} \sum_{k=1}^K SQ_{is} Y_{ijk} + Z_{is} \geq 1 \quad \forall i, s \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I SQ_{is} - \sum_{j=1}^J PQ_{js} \leq 0, \quad \forall s \quad (9)$$

$$Y_{ijk} - Y_{ij(k-1)} - M_{ijk} \leq 0, \quad \forall i, j \text{ and } k > SA_{i,firstday} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I SA_{i,power} Y_{ijk} \leq PA_{j,power} \quad \forall j, k \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^I Y_{ijk} \leq PA_{j,housing} \quad \forall j, k \quad (12)$$

$$SQ_{is} PQ_{js} Y_{ijk} + \sum_k^{k+(SQT_{is}-1)} M_{ijk} \geq 1 \quad \forall i, j, s \text{ and } k \geq SA_{i,firstday} \quad (13)$$

$$\sum_{h \neq i} Y_{hjk} + Y_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in \text{NONEST}, \quad j \in \text{MP and } k \quad (14)$$

$$Y_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k \quad (15)$$

$$Z_{is} \in \{0, 1\} \quad \forall i, s \quad (16)$$

$$M_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k \quad (17)$$

목적식 (1)은 항내 계류 중인 함정 수를 최소화함으로써 함정 가동률을 최대화 하는 것이다.

제약식 (2)는 한 척의 함정은 한개 선석의 정박위치에 계류할 수 있는 의미이며 식 (3)은 계류위치 한 개소당 함정 한 척씩만 계류하는 것을 나타낸다.

함정 일정에 관한 제약식인 식 (4)는 함정이 항내 계류할 수 있는 기간은 함정이 계획된 일정보다 오래 계류할 수 없는 의미이며 식 (5)는 최소한 서비스 시간만을 계상한 기간만큼은 항내에 머물러야 하는 조건이다. 식 (6)은 함정이 필요로 하는 서비스를 모두 마치면 항내 머물러야 하는 기간보다 더 일찍 출항할 수 있는 조건을 나타낸다. 식 (7)은 함정이 기계화된 기간에만 항내 계류할 수 있는 것을 나타낸다.

서비스 관련 제약식인 식 (8)은 함정  $i$ 가 필요한 서비스  $s$ 를 받았는지를 나타내는 결정변수  $Z_{is}$ 를 정의하고 식 (9)는 함정이 필요로 하는 서비스는 그 서비스를 지원하는 선석에서 받아야 하는 제약식이다.

식 (10)은 선석이동을 나타내는 제약식이다. 예를 들어 DD1함이  $k=1$ 시점에 1부두에서  $k=2$ 시점에 3부두로 선석이동을 한다고 가정하면, 선석이동을 한 시점에서 계산되므로 이동시점은  $k=2$ 가 된다. 이 경우  $Y_{DD1,1,2} = 0$ ,  $Y_{DD1,1,1} = 1$ ,  $Y_{DD1,3,2} = 1$ ,  $Y_{DD1,3,1} = 0$ 의 값을 갖게 되고 그 결과 아래의 관계식을 가져올 수 있다. 따라서 선석이동을 나타내는 변수가  $M_{DD1,1,2} = 0$ ,  $M_{DD1,3,2} = 1$ 로 정해짐을 확인할 수 있다.

$$Y_{DD1,1,2} - Y_{DD1,1,1} \leq M_{DD1,1,2} \Rightarrow 0 - 1 \leq 0$$

$$Y_{DD1,3,2} - Y_{DD1,3,1} \leq M_{DD1,3,2} \Rightarrow 1 - 0 \leq 1$$

식 (11)은 각 부두는 부두에 계류하는 모든 함정에 전원을 공급할 수 있는 전원케이블 수를 보유해야 하는 제약을 나타내고 식 (12)는 선석의 함정 수용능력을 나타내며 식 (13)은 함정  $i$ 가 일자  $k$ 에 선석  $j$ 에서 서비스  $s$ 를 받을 때 서비스 소요시간이 2 이상인 경우( $SQT_{is} \geq 2$ ) 그 서비스가 종료될 때까지 선석이동을 하지 않는 제약을 나타낸다. 식 (14)는 무장작업을 필요로 하는 함정이 무장작업을 지원하는 선석에서 단독계류를 해야 하는 의미이며 식 (15), (16), (17)은 결정변수들로 이진변수 제약식이다.

## 4. 모형 적용 및 분석

### 4.1 문제 구성 및 모형 실행

본 연구의 수리모형을 실험하기 위해 가상 시나리오를 설정하였으며 실험도구로는 모형의 최적값 산출을 위해

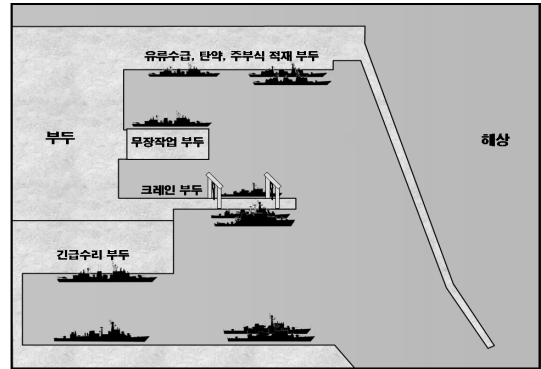


그림 1. 군항 구성도

ILOG CPLEX 11.0을 활용하였다. 컴퓨터는 Dual-Core CPU 6420 2.13GHz, RAM 2GB를 사용하였다. 함정 15척이 10일간 4개의 부두에 정해진 기간에 입항을 하여 효율적인 선석할당을 통해 서비스를 신속히 마치고 부두에 잔류하는 함정 수를 최소화하는 것으로 문제를 구성하였다. 일반적인 군항의 구성도는 그림 1과 같다.

전시 해군 선석에서 지원하는 서비스는 긴급수리, 유류수급, 무장적재, 크레인작업, 탄약적재, 부식적재 등 6가지로 분류할 수 있다. 표 1은 함정의 특성을 나타내는 입

표 1. 함정 특성 자료

함정	입항일	출항일	길이	케이블	단독계류	
구축함 (KDX-II)	DD1	1	9	150	1	필요
	DD2	5	19	150	1	필요
구축함 (KDX-I)	D3	1	9	140	1	필요
	D4	4	12	140	1	필요
	D5	7	19	140	1	필요
호위함	F6	1	10	100	1	필요
	F7	11	17	100	1	불필요
	F8	13	19	100	1	필요
초계함	P9	1	5	90	1	필요
	P10	1	5	90	1	불필요
	P11	9	17	90	1	필요
	P12	3	10	90	1	필요
	P13	12	19	90	1	불필요
	P14	11	18	90	1	필요
	군수지원함	A15	1	13	130	1

\* 출처 : 2008 Jane's Fighting Ships

력 자료이다. 함정 특성에 관한 자료는 “Jane’s Fighting Ships” 한국함정 편에서 발췌하였으며 함정의 종류 및 척수는 전방해역에서 실제로 작전을 실시하고 있는 전투함정을 대상으로 선정하였다.

함정별 필요한 서비스와 서비스 소요기간에 관한 정보는 표 2와 같다. 실질적으로 각 함정의 필요한 서비스와

표 2. 함정별 요구 서비스 및 서비스 소요기간

함정	긴급 수리	유류 수급	무장 작업	크레인 작업	탄약 작업	부식 작업	총 작업기간
DD1	0	0.5	1	0	0.5	0.5	2.5
DD2	1.5	1	2	0.5	1	0.5	6.5
D3	0	1	1	0	1	0.5	3.5
D4	0	1	1	0	0	0.5	2.5
D5	1	1	1	1	1	0.5	5.5
F6	2	0.5	0.5	0	0.5	0.5	4
F7	0	0.5	0	0	0.5	0.5	1.5
F8	0	0.5	0.5	0	0	0.5	1.5
P9	0	0.5	0.5	0	0	0.5	1.5
P10	0	0.5	0	0	0.5	0.5	1.5
P11	2	0.5	0.5	0	0	0.5	3.5
P12	1	0.5	0.5	0	0	0.5	2.5
P13	1	0.5	0	0.5	0.5	0.5	3
P14	0	0.5	0.5	0	0.5	0.5	2
A15	3	1	0	1	0	0.5	5.5

\* 출처 : 항박일지 (단위 : 일)

표 3. 부두 특성 자료

부두	길이	케이블 수	수용능력
1	180	3	3
2	180	3	3
3	180	3	3
4	180	3	1

\* 출처 : 해군본부, 안전지침서, 2003년

표 4. 부두별 지원가능 서비스

부두	긴급 수리	유류 수급	무장 작업	크레인 작업	탄약 작업	부식 작업
1	불가능	가능	불가능	불가능	가능	가능
2	불가능	가능	불가능	불가능	가능	가능
3	가능	불가능	불가능	가능	불가능	불가능
4	불가능	불가능	가능	불가능	불가능	불가능

\* 출처 : 해군본부, 안전지침서, 2003년

서비스 소요기간은 입항 전까지 알 수가 없다. 그러나 함정의 입항이 결정되면 입항하는 함정이 입항기간 동안 어떤 서비스를 어느 정도 받아야 하는 것이 확실시 되고 이에 따라 함정 일정 및 선석 할당을 계획하게 된다.

예를 들어, 함정 DD1이 해상에서 적과의 교전으로 소모된 자원이 유도탄 8기, 유류 40%, 주·부식 5일분이며 발전기 1대가 고장 난 상황을 가정한다. 이와 같은 서비스를 받기 위해 입항을 하면 위 서비스는 과거 항박일지의 기록에 의해 각각의 적재시간을 추정 할 수 있고 이 자료를 선석할당에 이용할 수 있다.

부두 특성에 관한 정보는 표 3과 같다. 모든 부두가 3척을 동시에 수용할 수 있지만 무장작업 서비스를 지원하는 부두는 1척의 함정만 수용토록 제한한다.

표 4는 부두별로 지원 가능한 서비스를 나타내며 부두별 서비스 관련 시설설치 여부에 따라 표와 같은 서비스를 지원할 수 있다.

### 4.2 선석할당 결과

그림 2는  $k=1$ 시점에 수리모형의 선석할당 결과이다.

ILOG CPLEX에 의해 선석할당의 결과치를 검증하기 위해 한국해군이 현재 적용하고 있는 일정계획(scheduling) 기법에 의한 선석할당 결과 값과 비교하였다. 해군 일정 계획 기법에 의한 선석할당은 아래와 같은 원칙에 의해 이루어진다.

첫째, 함정의 필요한 서비스 수를 확인한다.

둘째, 부두 내 계류 가능 선석 수를 확인한다. 가능 선석이 없다면 다른 선석에 우선 할당하되, 그 대기시간을 최소화한다.

셋째, 함정이 최단시간 내 필요한 서비스를 받을 수 있도록 선석을 할당하고 불필요한 선석 이동을 최소화한다.

표 5는 ILOG CPLEX 실행 결과, 표 6은 해군 실무자에 의한 일정계획 기법으로 작성된 선석할당 결과로 함정  $i$ 가  $j$ 기간 중 부두에 계류 시 어느 선석에 계류했는지에 대한 정보를 제공하는 결과치( $Y_{ijk}$ )이다. 수리모형에 의

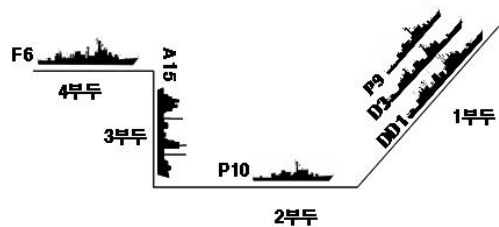


그림 2. 수리모형의 선석할당 결과( $k=1$ )

표 5. 수리모형에 의한 선석할당 결과

$Y_{ijk}$	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1 부두	<sup>O</sup> DD1 <sup>O</sup> D3 <sup>O</sup> P9	<sup>A</sup> DD1 <sup>O</sup> D3	<sup>F</sup> DD1 <sup>A</sup> D3 <sup>F</sup> P9	<sup>A</sup> D3 <sup>O</sup> D4	<sup>O</sup> DD2 <sup>F</sup> D3 <sup>O</sup> D4	<sup>O</sup> DD2 <sup>F</sup> D4	<sup>A</sup> DD2 <sup>H</sup> D4	<sup>A</sup> DD2	<sup>F</sup> DD2 <sup>O</sup> A15	<sup>O</sup> A15	<sup>F</sup> A15 <sup>O</sup> F7	<sup>A</sup> F7	<sup>F</sup> F7 <sup>O</sup> F8 <sup>O</sup> P11	<sup>F</sup> F8 <sup>F</sup> P11	<sup>H</sup> P11 <sup>O</sup> P13	<sup>A</sup> P13	<sup>F</sup> P13				
2 부두	<sup>O</sup> P10	<sup>A</sup> P10	<sup>F</sup> P10			<sup>O</sup> F6 <del><sup>F</sup>P11</del>	<sup>A</sup> F6 <del><sup>F</sup>A2</del>	<sup>F</sup> F6			<sup>O</sup> D5 <sup>O</sup> P14	<sup>O</sup> D5 <sup>A</sup> P14	<sup>A</sup> D5 <sup>F</sup> P14	<sup>A</sup> D5	<sup>F</sup> D5	<sup>H</sup> D5					
3 부두	<sup>R</sup> A15	<sup>R</sup> A15 <sup>R</sup> F6	<sup>R</sup> A15 <sup>R</sup> F6	<sup>R</sup> A15 <sup>R</sup> F6	<sup>R</sup> A15 <sup>R</sup> F6 <del><sup>R</sup>P11</del>	<sup>R</sup> A15 <sup>R</sup> F6 <del><sup>R</sup>P12</del>	<sup>R</sup> D5 <sup>C</sup> A15	<sup>R</sup> D5 <sup>C</sup> A15	<sup>C</sup> D5 <sup>R</sup> P11	<sup>C</sup> D5 <sup>R</sup> P11	<sup>R</sup> P11	<sup>R</sup> P11 <sup>R</sup> P13	<sup>R</sup> P13	<sup>R</sup> DD2 <sup>C</sup> P13	<sup>R</sup> DD2	<sup>R</sup> DD2	<sup>C</sup> DD2				
4 부두	<sup>W</sup> F6	<sup>W</sup> P9	<sup>W</sup> P11	<sup>W</sup> DD1	<sup>W</sup> DD1	<sup>W</sup> D3	<sup>W</sup> D3	<sup>W</sup> D4	<sup>W</sup> D4	<sup>W</sup> DD2	<sup>W</sup> DD2	<sup>W</sup> DD2	<sup>W</sup> DD2	<sup>W</sup> P14	<sup>W</sup> F8	<sup>W</sup> P11	<sup>W</sup> D5	<sup>W</sup> D5			
합정수	6	6	7	6	7	6	7	5	5	4	6	6	7	6	5	4	3	1	0	0	
총 합정수	97 (1일 평균 항내 계류중인 합정수 : 4.85척, 해상 출동중인 합정수 : 10.15척)																				

\* 기호설명 : R:긴급수리, O:유류수급, W:무장작업, C:크레인작업, A:탄약작업, F:부식작업, H:대기

표 6. 해군 일정계획기법에 의한 선석할당 결과

$Y_{ijk}$	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
1 부두	<sup>O</sup> D3 <sup>O</sup> P9 <sup>O</sup> P10	<sup>O</sup> D3 <sup>F</sup> P9 <sup>A</sup> P10	<sup>F</sup> D3 <sup>F</sup> P10	<sup>A</sup> D3 <sup>O</sup> D4	<sup>O</sup> DD2 <sup>A</sup> D3 <sup>O</sup> D4	<sup>O</sup> DD2 <sup>F</sup> D4	<sup>F</sup> DD2 <sup>H</sup> D4	<sup>A</sup> DD2 <sup>H</sup> D4	<sup>A</sup> DD2		<sup>O</sup> F7 <sup>O</sup> P14	<sup>A</sup> F7 <sup>A</sup> P14	<sup>F</sup> F7 <sup>O</sup> F8 <sup>F</sup> P14	<sup>F</sup> F8 <sup>H</sup> P14	<sup>H</sup> F8 <sup>H</sup> P14	<sup>H</sup> F8 <sup>H</sup> P14	<sup>H</sup> P14	<sup>H</sup> P14	<sup>H</sup> P14	<sup>H</sup> P14	<sup>H</sup> P14		
2 부두	<sup>O</sup> DD1	<sup>A</sup> DD1 <sup>A</sup> F6	<sup>F</sup> DD1 <sup>F</sup> F6	<sup>O</sup> F6		<sup>F</sup> P11 <del><sup>F</sup>P12</del>	<sup>H</sup> P12	<sup>O</sup> D5 <sup>O</sup> A15	<sup>O</sup> D5 <sup>O</sup> A15	<sup>A</sup> D5	<sup>A</sup> D5	<sup>F</sup> A15 <sup>O</sup> P13	<sup>O</sup> P13	<sup>O</sup> P11 <sup>A</sup> P13	<sup>F</sup> P11 <sup>F</sup> P13	<sup>H</sup> P11	<sup>H</sup> P11	<sup>F</sup> D5					
3 부두	<sup>R</sup> A15	<sup>R</sup> A15	<sup>R</sup> A15	<sup>R</sup> A15 <del><sup>R</sup>P11</del>	<sup>R</sup> A15 <sup>R</sup> F6 <del><sup>R</sup>P12</del>	<sup>R</sup> A15 <sup>R</sup> F6	<sup>C</sup> A15 <sup>R</sup> F6	<sup>C</sup> A15 <sup>R</sup> F6	<sup>R</sup> P11	<sup>R</sup> DD2 <sup>R</sup> P11	<sup>R</sup> DD2 <sup>R</sup> P11	<sup>R</sup> DD2 <sup>R</sup> P11	<sup>R</sup> D5	<sup>R</sup> D5	<sup>C</sup> D5 <sup>R</sup> P13	<sup>C</sup> D5 <sup>R</sup> P13	<sup>C</sup> DD2 <sup>C</sup> P13						
4 부두	<sup>W</sup> F6		<sup>W</sup> P9	<sup>W</sup> DD1	<sup>W</sup> DD1	<sup>W</sup> D3	<sup>W</sup> D3	<del><sup>W</sup>A2</del>	<sup>W</sup> D4	<sup>W</sup> D4	<sup>W</sup> D5	<sup>W</sup> D5	<sup>W</sup> DD2	<sup>W</sup> DD2	<sup>W</sup> DD2	<sup>W</sup> DD2	<sup>W</sup> F8	<sup>W</sup> P11					
합정수	6	6	7	6	7	6	7	6	5	5	6	6	7	6	6	6	6	2	0	0			
총 합정수	106 (1일 평균 항내 계류 중인 합정수 : 5.3척, 해상에 출동중인 합정수 : 9.7척)																						

\* 기호설명 : R:긴급수리, O:유류수급, W:무장작업, C:크레인작업, A:탄약작업, F:부식작업, H:대기

한 선석할당 결과인 표 5를 통해 각 합정들의 서비스 순서를 확인 할 수 있다.

예를 들어, k=3시점에 4부두로 입항한 합정 P12의 서비스 순서는 무장작업 → 긴급수리 → 유류수급 → 부식적재 순이며 이 기간 중 2회의 선석이동이 있었지만 서비스 가능한 선석에 가기 위한 선석이동으로 불필요한 선석이동은 없다.

그러나 해군 일정계획 기법에 의한 선석할당 결과인 표 6을 통해 불필요한 선석이동이 발생한 것을 알 수 있다. k=3시점에 1부두로 입항한 합정 P12의 서비스 순서는 유류수급 → 긴급수리 → 부식적재 → 대기 → 무장작업 순이며 이 기간 중 3회의 선석이동을 실시하였으며 이 중 1회의 선석이동은 불필요한 선석이동이다. 유류수급과 부식적재는 같은 부두에서 실시할 수 있으나 유류수

급 서비스 후 긴급수리 서비스를 받기위해 선석이동을 함으로써 불필요한 선석이동이 발생하였다. 또한 필요한 서비스를 적기에 받지 못하고 1기간 대기하는 경우가 발생하여 총 항내 계류기간을 늘리는 상황이 발생하였다.

표 7, 표 8은 수리모형과 해군 일정계획 기법에 의한

선석할당 결과에 따른 각 함정별 선석이동 순서를 나타낸다. 표 안에 기록된 숫자는 부두를 나타내며 공란은 함정이 입항 전이나 출항 후이므로 항내 존재하지 않는 의미이다. 표 7에서 보면 수리모형에 의한 함정 P11의 선석이동 순서는 3 → 3 → 3 → 3 → 1 → 1 → 1 → 4부두

표 7. 수리모형에 의한 함정별 선석이동 순서

구분	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
DD1	1	1	1	4	4															
DD2					1	1	1	1	1	4	4	4	4	3	3	3	3			
D3	1	1	1	1	1	4	4													
D4				1	1	1	1	4	4											
D5																				
F6	4	3	3	3	3	2	2	2												
F7																				
F8																				
P9	1	4	4																	
P10	2	2	2																	
P11																				
P12																				
P13																				
P14																				
A15	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

\* 기호설명 : □:입항, ○:선석이동, △:서비스 종료로 다음기간에 출항

표 8. 해군 일정계획기법에 의한 함정별 선석이동 순서

구분	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
DD1	2	2	2	4	4															
DD2					1	1	1	1	1	3	3	3	4	4	4	4				
D3	1	1	1	1	1	4	4													
D4				1	1	1	1	1	4	4										
D5																				
F6	4	2	2	2	3	3	3	3												
F7																				
F8																				
P9	1	1	4																	
P10	1	1	1																	
P11																				
P12																				
P13																				
P14																				
A15	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

\* 기호설명 : □:입항, ○:선석이동, △:서비스 종료로 다음기간에 출항

순이다. 항내 계류기간은 기간 9에서 기간 16까지 총 8 기간이며 이 기간 중 13기간과 16기간에 선석이동을 2회 실시한다. 해군 일정계획에 의해 작성된 표 8을 분석하면 함정 P11의 선석이동 순서는 3 → 3 → 3 → 3 → 2 → 2 → 2 → 2 → 4부두 순이다. 항내 계류기간은 기간 9에서 기간 18까지 총 10 기간이며 이 기간 중 13기간과 18기간에 선석이동을 2회 실시한다. 수리모형과 해군 일정계획 기법에 의한 함정 P11의 항내 계류기간과 선석이동 횟수를 비교해 본 결과 선석이동 횟수는 동일하지만 항내 계류기간은 수리모형에 의한 결과 값이 2기간 적다.

### 4.3 모형 분석

수리모형에 의한 선석할당은 함정이 필요로 하는 서비스를 모두 충족시키지만 해군 일정계획 기법에 의한 선석할당에서는 함정 P14가 무장작업을 제공받지 못하였다. 또한, 수리모형에 의한 목적함수 값은 97이며 1일 평균 해상에 출동 중인 함정의 수는 10.15척으로 가동률은 67.6%이다. 반면에, 해군 일정계획 기법에 의한 값은 각각 106과 9.7척이며 가동률은 64.6%이다. 즉 수리모형에 의한 선석할당이 더 효과적이며 전시 교전에 참가할 수 있는 함정의 수를 더 증가시킬 수 있다.

전체 함정의 선석이동에 대해 수리모형은 총 19회, 해군 일정계획 기법은 총 21회 선석이동을 계획한다. 선석이동은 총 작업시간이 지연될 뿐 아니라 인력, 장비, 유류 등 여러 부분에 있어서 비용증가를 야기 시키기 때문에 선석이동을 최소화하는 것이 타당하다.

본 모형에서 서비스 수와 서비스 소요기간은 실제 교전에 따른 함정피해 정도 및 군수물자 부족 여부에 따라 변화하기 때문에 불확실성을 가지고 있으므로 이 불확실한 변수의 변화에 대한 민감도 분석을 통하여 파악한다.

첫 번째, 서비스 수의 변화이다. 예를 들어 교전 후 선체에 피해를 받지 않았다면 긴급수리 서비스는 필요 없으므로 서비스 수가 증가하지 않는다. 서비스 수를 변경 시킨 모형의 실행 결과는 그림 3과 같다. 총 서비스 수 10단위씩 증가에 따라 항내 계류 함정 수가 이에 비례하여 선형(기울기 약 1.3)으로 증가하였다.

두 번째, 서비스 소요기간의 변화이다. 예를 들어 무장을 많이 소모했으면 무장적재 기간도 늘어날 것이다. 서비스 소요기간을 변경 시킨 모형의 실행 결과는 그림 4와 같다. 서비스 소요기간 15단위씩 증가시킴에 따라 항내 계류 함정 수가 이에 비례하여 선형(기울기 약 1.1)으로 증가하였다.

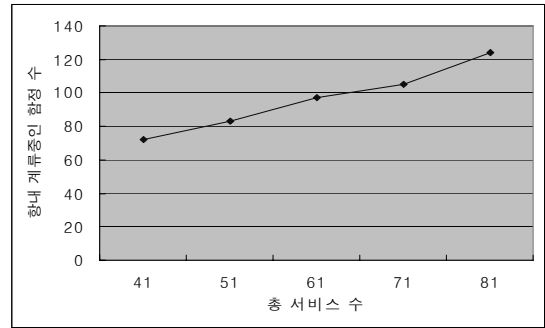


그림 3. 총 서비스 수 변화에 따른 목적함수

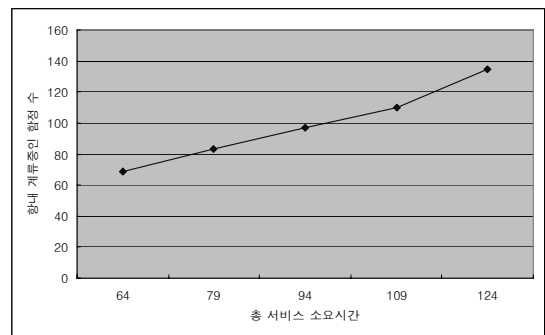


그림 4. 총 서비스 소요시간 변화에 따른 목적함수

## 5. 결 론

전시 해군함정이 해상에서 교전 중 함정의 파손이나 무장, 유류, 부식 등 전쟁수행에 필요한 자원을 받기 위해 또는 필요시 자함에 요구되는 서비스를 받기 위해 모항에 귀항 시 최단시간 내 필요한 서비스를 마치고 다시 전장에 투입하기 위해 부두에 계류 중인 함정의 수를 최소화 함으로써 함정 가동률을 최대화하는 수리모형을 제시하였다.

본 연구의 모형을 분석하기 위해 현실 상황을 가정한 시나리오를 구축하여 본 모형에 적용한 결과 수리모형에 의한 선석할당이 해군 일정계획 기법에 의한 선석할당보다 효과적이며 전시 교전에 참가할 수 있는 함정의 수를 더 증가시킬 수 있다는 결과를 도출하였다.

향후 연구과제는 선석이동시 소요되는 자함 또는 항내 주정(harbor tug)의 유류비, 도선사(pilot) 인건비 등의 비용부분을 고려해 모형을 작성하는 것이다. 군항 선석할당 문제에 비용변수를 추가하여 고려한다면 부대 운영비를 감소시키는데 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 전시 상



황을 고려시 중요한 문제로 대두되는 함정의 피해규모(파손정도)를 감안한 연구도 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. 정환식, 김재희, 김승권 (2004), “서비스 전후 우선순위를 고려한 해군함정의 선석 할당에 관한 연구”, *한국항해항만학회지*, 제28권, 제1호, pp. 83-90.
2. Lim, A. (1998), “The berth planning problem”, *Operations Research Letters*, 22, pp. 105-110.
3. 홍동희(2005), “시물레이션과 유전자 알고리즘을 이용한 선석계획과 야드 설계의 통합”, *해운물류연구*, 제44호, pp. 77-92.
4. 정다훈, 박영만, 이병권, 김갑환(2006), “컨테이너 터미널에서 일반부두와 양현부두의 본선작업 완료시간 비교 연구”, *한국경영과학회 학술대회 논문집*, 제11호, pp. 336-3455.
5. Wang, F., Lim, A. (2007), “A stochastic beam search for the berth allocation problem”, *Decision support systems* 42(4), pp. 2186-2196.
6. Imai, A., Nishimura, E., Hattori, M., Papadimitriou, S. (2007), “Berth allocation at indented berths for mega-containerships”, *European Journal of Operational Research*, 179(2), pp. 579-593.
7. Hansen, P., Oguz, C., Mladenovic, N. (2008), “Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation”, *European Journal of Operational Research*, 191(3), pp. 636-649.
8. Brown, G.G., Lawphongpanich, S., Thurman, K.P. (1994), “Optimizing ship berthing”, *Naval Research Logistics*, 41, pp. 1-15.



**원 현 식** (navywhs@naver.com)

2000 해군사관학교 경영과학 학사  
 2008 국방대학교 운영분석 석사  
 2009~현재 해군 제1함대사령부 참-363호 정장

관심분야 : 최적화, 시물레이션



**안 태 호** (ahnt@ssu.ac.kr)

1984 고려대학교 독문학 학사  
 1991 Pennsylvania State University MBA 석사  
 1994 University of Florida 경영과학(OR) 박사  
 현재 송실대학교 경영학부 교수

관심분야 : 시물레이션, 스케줄링, 리스크분석



**이 상 현** (leesangh@kndu.ac.kr)

1977 육군사관학교 전기공학 학사  
 1985 미 Naval Postgraduate School 산업공학 석사  
 1991 미 Georgia Institute of Technology 산업공학 박사  
 2000~현재 국방대학교 운영분석학과 교수

관심분야 : 최적화 및 네트워크모형, SCM, 시물레이션