

서비스 전후 우선순위를 고려한 해군함정의 선석 할당에 관한 연구

정환식* · 김재희* · 김승권**

*고려대학교 대학원, **고려대학교 산업시스템정보공학과 교수

A Study on Berth Allocation for Navy Surface Vessels Considering Precedence Relationships among Services

Whan-Sik Jung* · Jae-Hee Kim* · Sheung-Kwon Kim**

*Graduate School of Korea University

**Professor, Dept. of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University

요약 : 경비, 훈련, 지원 등의 해상 임무를 종료한 해군 함정은 차기 임무를 준비하기 위해 모항에 입항하여 긴급수리, 유류수급, 무장 적하역, 크레인, 태세유지, 수리, 포 배열, 탄약적재, 부식 작업 등의 일련의 서비스를 필요로 한다. 본 연구에서는 한정된 선석과 설비 자원 하에서 여러 함정에 대한 효율적인 선석 할당 계획의 수립을 목적으로 한다. 이를 위해 불필요한 선석이동을 줄이고 계획기간 동안 각 함정이 필요로 하는 서비스를 점수화한 총점을 최대화하는 기존의 모형을 토대로, 서비스 지속 기간이 제한적이고 서비스들 간의 전후 우선순위가 존재하는 현실적인 제약을 고려하면서 전비태세를 향상시킬 수 있는 혼합 정수 계획 모형(Mixed Integer Programming)을 수립해 보았다. 효과적인 분석을 위하여 ILOG OPL(Optimization Programming Language) Studio 3.1을 사용하여 모델링 한 후 ILOG CPLEX 7.0으로 최적해를 구해 보았다. 본 연구에서 제시한 모형이 해군 함정의 효율적인 선석 할당 계획 수립에 적용될 수 있다면 해군 부대의 전비태세 향상에 기여를 할 수 있을 것으로 생각된다.

핵심용어 : 선석 할당, 최적화, 해군 함정, 서비스 전후 관계, 서비스 우선순위, 전비태세

Abstract : Navy surface vessels require pier services such as emergency repair, oil supply, arm loading / unloading, craning, standby readiness, normal repair, gun arrangement, ammunition loading, and food loading during the period in port. The purpose of this study is to establish efficient berth allocation plan for navy surface vessels in home port under the limited resources of piers and equipments. This study suggests Mixed Integer Programming model for berth allocation problem, considering precedence relationships among services. For an effective analysis, the model is implemented by ILOG OPL(Optimization Programming Language) Studio 3.1 and ILOG CPLEX 7.0. The results of the model show reduction of berth shifts and increasement of service benefits.

Key Words : berth allocation, optimization, navy surface vessel, precedence relationships, fleet readiness

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

효율적인 항만 운영은 21세기 주력산업으로 그 중요성을 더해가고 있다. 그 중 선석, 즉 선석 할당 문제는 항만운영 및 관리의 첫 단계로 볼 수 있으며 항만 운영에 있어 매우 중요한 부분이다 (유 등, 1999).

선석 할당 문제는 민간 항만에서 뿐만 아니라 해군 부대에 있어서도 중요한 역할을 담당한다. 화물 적재/하역을 주 임무로 하는 민간 항만과 달리 해군 부대의 선석 할당 문제는 해상 임무를 마치고 모항에 복귀한 함정에 대해 긴급수리, 유류수급, 무장 적하역, 크레인, 태세유지, 수리, 포 배열, 탄약적재, 부식 작업등과 같은 서비스를 제공함으로써 적고도의 전비 태세를 유지시키는 것을 주 목적으로 한다.

한편, 각 선석은 함정이 필요로 하는 모든 서비스를 일괄적으로 제공하는 대신 선석의 특성에 따라 각기 다른 서비스를 한정적으로 지원할 수 있다 (Papworth, 1989). 따라서 함정의 특성, 함정이 필요로 하는 서비스, 선석의 특성, 선석의 지원 가능한 서비스 등의 여러 현실 조건을 고려하여 각각의 해군 함정이 모항에 머무르는 기간 동안 필요한 서비스를 지연 없이 지원받도록 선석을 할당해야 한다.

현실적으로 실무자가 해군 함정의 특성, 필요한 서비스, 선석의 특성, 지원 가능한 서비스 등을 모두 고려하고 불필요한 선석이동까지 최소화한 최적의 선석 할당 계획을 수립하는 것은 매우 어려운 문제이다. 이에, 본 연구에서는 해군 함정의 전비태세 향상을 위해 한정된 선석과 설비 자원 하에서 서비스 전후 우선순위를 고려하고 불필요한 선석 이동을 최소화할 수 있는 선석 할당 계획 모형을 수립하고자 한다.

본 연구는 5절로 구성되어 있다. 제 2절에서는 선석 할당에 대한 절차와 기존 연구에 대한 고찰을 통해 본 연구에서 추구하는 방향에 대해 간단히 소개한다. 제 3절에서는 문제를 정의 하고 가정사항과 수리적 모형을 제시하였으며 이를 ILOG OPL(Optimization Programming Language) Studio 3.1로 구현해 보았다. 제 4절에서는 해군 부대에서 실현 가능한 하나의 예제에 대해 ILOG CPLEX 7.0을 활용해서 최적해를 구하고 선석 할당 결과를 분석했다. 제 5절에서는 연구의 성과 및 기대 효과, 그리고 향후 연구 방향에 대해 간략하게 서술하였다.

2. 관련 연구 고찰

2.1 일반적인 선석 할당 절차

민간 항만의 한 예로 인천항에 입항하는 선박의 선석 할당 절차를 살펴보면 Fig. 1 (a) 와 같다 (유 등, 1999). 입항하고자 하는 선박에 대한 선석 할당은 선박 입항 하루 전 회의를 통해 정한다. 인천항과 같은 민간 항만의 경우에 선석을 할당하는 작업은 입항하는 선박에 대한 입항시간 및 특성 등의 정보가 얼마나 충분히 항만 운영주체에게 제공되는가에 크게 좌우된다.

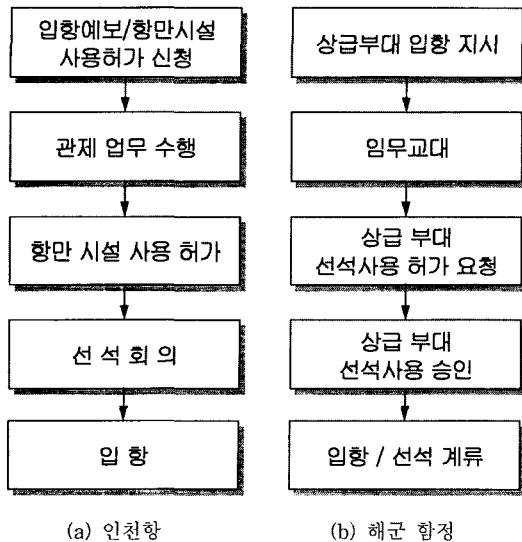


Fig. 1 Berth Allocation Process

해군 함정의 선석 할당 절차는 Fig. 1 (b) 와 같다. 해상에서 임무를 수행중인 해군 함정이 상급부대로부터 복귀명령을 받으면 임무를 교대하고 모항에 입항하기 전 사용 선석을 상급 부대에 요청하여 가능여부를 승인 받는다. 항만 운영 실무자들은 모항 상황을 토대로 최대한 함정의 입장을 고려하여 선석을 할당해 주려고 하지만 선석에 머무르는 함정들이 많으면 입항 함정의 요청사항을 100% 충족시켜 줄 수 없다.

2.2 기존 연구 고찰

민간 항만의 선석 할당에 관한 연구로는 국내외 많은 사례를 찾아 볼 수 있다. Lai et al. (1992)은 컨테이너선에 대한 여러 가지 선석 할당 정책을 시뮬레이션 실험을 통해서 비교했으며, Lim (1998)은 항만의 선석을 이산적인 공간의 집합이 아닌 연속적인 공간으로 생각함으로써 선석 할당 문제를 해결하기 위해 휴리스틱 방법을 제안했다. 민간 항만에서 대부분의 서비스는 일반적으로 FCFS (First-Come-First-Served)의 원칙에 따라 이루어지나 많은 선박들이 항만에 있을 경우 선석의 활용도를 높이기 위해서는 FCFS 원칙이 반드시 적용되지는 않는다. 그러나 이런 선석 할당은 일부 함정의 불만을 야기 시킬 수도 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해 Imai et al. (1997)은 비열등해(Non-inferior solution)를 찾기 위한 휴리스틱 알고리즘을 개발했다. 유 등 (1999)은 인천항에 대해 전문가의 경험적인 지식을 이용한 배정규칙에 따라 선석 할당을 수립할 수 있는 지식기반 실시간 의사결정지원시스템을 구축하였다. 최근 Kim et al. (2003)은 문제의 규모가 커서 최적해를 구하기 어려운 컨테이너선의 선석 할당 문제에 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)기법을 이용한 발견적 방법으로 최적해와 근사한 값을 제시하였다.

해군 함정의 선석 할당과 관련해서는 국내외를 통틀어서 미 해군에서 수행된 연구사례만을 찾아 볼 수 있다. Brown et al. (1994) 과 Thurman (1989)은 해군 함정이 선석에 머무르는 기간 동안 필요한 서비스를 우선순위에 따라 받음으로써 서비스를 점수화한 총점을 최대화시키는 혼합 정수 계획 모형을 수립하여 선석 할당 문제를 해결하고자 하였다.

본 연구에서는 Brown et al. (1994)과 Thurman (1989)에서 우선순위를 포괄적으로 고려하여 선석을 할당한 것과 달리, 서비스의 지속기간이 제한적이고 서비스 들 간의 전후 우선순위가 존재하는 현실적인 제약을 고려한 혼합 정수 계획 모형을 수립하였다.

3. 최적화 모형의 수립

3.1 문제정의

본 연구는 해군 함정이 해상에서 경비, 훈련, 지원 등의 각종 임무를 마치고 모항에 머무르는 기간 동안 차기 임무 준비를 위해 필요한 서비스를 효율적으로 받도록 해군 함정을 각 선석에 할당하는 문제이다.

해군 선석에서 지원하는 서비스는 다음과 같이 9개로 분류될 수 있다.

- 긴급수리
임무수행(경비, 훈련, 각종지원)중 갑작스런 장비고장 발생시 제공하는 서비스
- 수 리
정기적으로 수행되는 장비 정비/검사 서비스

- 크레인작업
수리기간 중 대형 장비를 적재/양육
- 무장작업
수리 전/후에 무장(탄약, 미사일)등을 적재/양육
- 탄약적재
사격훈련을 위한 탄약 수령
- 포 배열
수리 종료 후 포 상태를 검사
- 유류수급
차기 임무수행 대비를 위한 유류 수급
- 부식작업
차기 임무를 위한 부식 수령
- 태세유지
긴급 상황에 대비
선석에 머무르는 동안 각 해군 함정은 일단 Table 1과 같은 4가지 상태 중 하나로 분류되며, 상태별 가능 서비스 내에서 필요한 서비스를 제공받을 수 있게 된다.

Table 1 Available Services for each State of Vessels

함정의 상태	가능한 서비스
임무 수행 가능	긴급수리, 유류수급, 태세유지, 탄약적재, 부식작업
임무 수행 불가능	수리, 크레인 작업
임무 불가능 전환 단계 (임무 가능 → 불가능)	무장작업, 수리, 크레인작업
임무 가능 전환 단계 (불가능 → 가능)	무장작업, 포 배열

본 연구에서는 함정 유형 / 서비스별 중요도를 정하기 위해서 의사결정 참여자의 직관에 의한 평가 결과를 정량화할 수 있는 Saaty (1980)의 AHP (Analytic Hierarchy Process) 기법을 이용했다. 해군 함정의 서비스에 대한 중요도는 주관에 따라 차이가 있을 수 있다. 이런 정성적인 차이를 최대한 고려하기 위해 해군 함정 승조경력 5년 이상인 해군 장교 10명의 설문 결과를 활용했다. Fig. 2는 서비스별 중요도 측정을 위한 AHP 계층 구조이고, Table 2는 AHP 분석을 통해 서비스별 우선순위와 가중치를 구한 것이다.

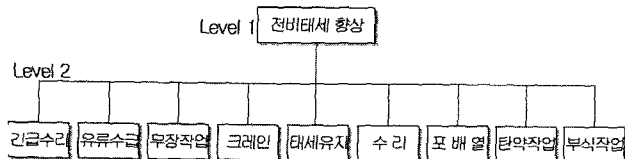


Fig. 2 Service Evaluation Hierarchy

Table 2 AHP Priorities on each Service

구 분	가 중 치
긴급수리	0.31
태세유지	0.16
유류수급	0.13
무장작업	0.10
크레인 작업	0.09
포 배열	0.07
탄약작업	0.06
수 리	0.04
부식작업	0.02

Table 3은 각 함정 유형별 가중치로, 구축함, 호위함, 군수지원함, 초계함에 대해 전문지식을 갖춘 해군 장교 10명의 의견을 종합하여 구한 것이다.

Table 3 Priorities on each Type of Vessels

우선순위	함 정 (대한민국 해군, 2003)	가중치
1	구축함 (KDX)	300
2	호위함 (FFK)	250
3	군수 지원함 (AOE)	200
4	초계함 (PCC / Missile)	150
5	초계함 PCC	100

Brown et al. (1994)은 함정 유형에 따라 규정된 최대 가중치를 기준으로 서비스들의 중요도를 구했는데, 본 연구에서는 Table 3의 함정 유형별 가중치에 Table 2의 서비스 가중치를 곱하여 얻은 값으로 함정 유형에 따른 서비스별 중요도를 나타내었다. 이 중요도 값은 서비스별 받기 못함으로써 발생하는 벌점(H_{sq})으로도 사용된다. 그 결과는 Table 4에 제시되어 있다.

Table 4 Service Priorities / Penalties for each Type of Vessels

함정	긴급수리	유류수급	무장작업	크레인작업	태세유지	수리	포배열	탄약적재	부식작업	선석 이동 벌점
KDX	94	40	30	26	48	13	21	19	6	6
FFK	79	33	25	22	40	11	18	16	5	5
AOE	63	27	20	17	32	9	14	13	4	4
PCC (Missile)	47	20	15	13	24	7	11	10	3	3
PCC	31	13	10	9	16	4	7	6	2	2

3.2 가정사항

- 선석의 수심은 함정의 흘수(배의 아래 부분이 물에 잠기는 깊이) 보다 충분히 깊다.

- 긴급수리, 유류수급, 무장작업등과 같은 서비스는 하루 안에 종료된다.
- 포 배열 함정은 최 외측 선석에 계류해야 한다.
- 무장작업을 하는 함정은 단일 계류해야 한다.

3.3 수리적 모형

본 연구에 사용된 기호의 정의와 수리 모형은 아래와 같다.

- 기호 정의
 - s : 함정 (vessel)
 - p : 선석 (berth)
 - n : 정박위치 (nesting position)
 - t : 일자 (day)
 - q : 서비스 (service)
 - SD_{sa} : 함정 s 의 특성치 (함정 s 의 길이, 전원케이블 수, 입항일, 출항일, 단일 계류여부, 최 외측 계류여부, 선석이 동 별점)
 - PD_{pa} : 선석 p 의 특성치 (선석 p 의 길이, 전원케이블 수)
 - WP : 무장선석의 집합
 - GP : 포 배열 선석의 집합
 - O : {긴급수리, 유류수급, 무장작업}과 같이 하루 안에 종료 되는 서비스의 집합
 - L_1 : {긴급수리, 유류}의 서비스 집합
 - L_2 : {무장작업, 포 배열}의 서비스 집합
 - L_3 : {태세유지, 크레인 작업, 수리, 탄약작업, 부식작업}의 서비스 집합
 - $\Omega(s)$: 함정 s 보다 길이가 적은 함정의 집합
 - ϕ : 서비스 q 를 지원하는 선석의 집합
 - π : 서비스 q 를 필요로 하는 함정의 집합
 - $NONEST$: 단일 계류를 해야 하는 함정의 집합
 - $NOOUT$: 최 외측 계류를 해야 하는 함정의 집합
 - LQ_{sq} : 함정 s 가 필요로 하는 서비스 q 에 대한 중요도
 - A_{op} : 서비스 q 가 선석 p 에서 가능하면 1, 그렇지 않으면 0
 - T_{st} : 함정 s 의 t 가 $SD_{s, arrive} \leq t \leq SD_{s, depart}$ 이면 1, 그렇지 않으면 0
 - SV_{sq} : 함정 s 가 서비스 q 를 필요로 하면 1, 그렇지 않으면 0
 - EXT : 함정이 선석길이를 초과하여 계류할 수 있는 최대길이
 - BTW : 함정의 함수(함미)와 선석 끝단 사이거리
 - BN_{spnt} : 함정이 선석 p , nesting position n , 시간 t 에 계류함으로써 생기는 점수
 - H_{sq} : 함정 s 가 서비스 q 를 받지 못함으로써 생기는 벌점

■ 결정 변수(Decision Variable)

- X_{spnt} : 함정 s 가 t 시점에 선석 p 의 정박위치 n 에 계류하면 1, 그렇지 않으면 0 ($T_{st}=1$ 경우에만 X_{spnt} 가 포함)
- Z_{spnt} : 함정 s 가 t 시점에 선석 p 의 정박위치 n 으로 이동하면 1, 그렇지 않으면 0
- U_{sq} : 함정 s 가 필요한 서비스 q 를 받지 못하면 1, 그렇지 않으면 0

■ 수리 모형

본 연구에서 사용된 수리 모형은 Brown et al (1994)이 수립한 것을 기반으로 하여 한국적 특성에 맞도록 보완된 것임을 밝혀둔다.

$$\text{Max } \sum_{spnt} BN_{spnt} X_{spnt} - \sum_{spnt} SD_{s, penalty} Z_{spnt} - \sum_{sq} H_{sq} U_{sq} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_s (SD_{s, length} + BTW) X_{spnt} \leq PD_{p, length} + EXT, \forall p, t, \quad (2)$$

$$\sum_{sn} SD_{s, power} X_{spnt} \leq PD_{p, power}, \forall p, t, \quad (3)$$

$$\sum_{pn} X_{spnt} = 1, \forall s, t, \quad (4)$$

$$\sum_s X_{spnt} \leq 1, \forall p, n, t, \quad (5)$$

$$X_{spnt} - X_{spn(t-1)} - Z_{spnt} \leq 0, \forall s, p, n, \text{ and } t > SD_{s, arrive} \quad (6)$$

$$\sum_{\sigma \in \Omega(s)} \sum_{m < n} X_{\sigma pmt} + (n-1)X_{spnt} \leq (n-1), \quad (7)$$

$\forall s, p, t, \text{ and } n \geq 2,$

$$\sum_m \sum_{\sigma \neq s} X_{\sigma pmt} + NX_{spnt} \leq N, \quad (8)$$

$\forall t \text{ and } p \in \mathcal{S}, s \in NONEST$

$$\sum_{\sigma \in \Omega(s)} \sum_{m > n} X_{\sigma pmt} + (N-n)X_{spnt} \leq (N-n), \quad (9)$$

$\forall t, \text{ and } n \leq (N-1), p \in GP, s \in NOOUT$

$$\sum_s X_{spnt} - \sum_s X_{sp(n-1)t} \leq 0, \forall p, t, \text{ and } n \geq 2, \quad (10)$$

$$\sum_{p \in \phi(q)} \sum_{nt} SV_{sq} X_{spnt} + U_{sq} \geq 1, \quad \forall s, q, \quad (11)$$

$$\sum_{p \in \phi(q)} \sum_n \sum_t X_{spnt} \leq 1, \quad \forall s \in \pi(q), q \in O, \quad (12)$$

$$T_{p_1 \in \phi(q_1)} \sum_n \sum_{t=1}^t X_{sp_1 nt} \geq \sum_n \sum_{t=1}^t X_{sp_2 nt}, \quad \forall p_2 \in \phi(q_2),$$

$$q_1 \in L_1 \cup L_2, q_2 \in L_2 \cup L_3, s \in \pi(q_1), t \geq 1, \quad (13)$$

$$X_{spt} \in 0, 1 \quad \forall s, p, n, t, \quad (14)$$

$$Z_{spt} \in 0, 1 \quad \forall s, p, n, t, \quad (15)$$

$$U_{sq} \in 0, 1 \quad \forall s, p, n, t, \quad (16)$$

BN_{spt} 는 Table 4의 합정 유형과 서비스별 중요도를 기반으로 계산되며, 식은 (17)과 같다. 서비스 q 를 필요로 하는 합정 s 가 q 를 지원하는 선석에 있으면 점수를 얻는다. 기레보다는 현재를 더 중요하게 반영하고 있으며, 모항에 머무르는 기간동안 서비스 점수는 누적된다. 그러나 긴급수리, 유류수급, 무장작업, 크레인 작업과 같은 서비스는 하루 안에 끝나기 때문에 서비스 점수가 누적되지 않는다.

$$BN_{spt} = e^{\left(\frac{-t}{T}\right)} \left(\sum_q LQ_{sq} A_{qp} \right) \quad (17)$$

목적함수는 식 (1)과 같다. 합정이 필요로 하는 서비스를 지원 선석에서 받음으로써 서비스를 점수화한 총점을 최대화, 선석이동으로 인한 합정의 선석이동 별점을 최소화, 필요한 서비스를 받지 못함으로써 생기는 별점이 최소화 될 수 있도록 구성했다. 식 (2)는 선석 길이가 최 내측 nesting position=1)에 있는 합정 s 의 길이보다 커야 된다는 것을 나타내며, 식 (3)은 선석에서 제공할 수 있는 전원 케이블 수에 대한 제약을 나타낸다. 식 (4)는 시간 t 시점의 합정 s 는 다른 선석의 정박위치에 동시에 계류할 수 없다는 물리적인 제약에 해당된다. 식 (5)는 선석의 정박위치마다 최대한 한 척의 해군 합정만을 수용한다는 것을 나타낸다. 식 (6)은 선석이동을 표시하는 변수 Z_{spt} 를 정해준다. 예를 들어 K1합이 $t=3$ 시점에 5선석의 정박위치 2에서 다음날 1선석의 정박위치 1로 선석이동을 한다고 하자. 이 경우 $X_{K1.5.2.4}=0, X_{K1.5.2.3}=1, X_{K1.1.1.4}=1, X_{K1.1.1.3}=0$ 의 값을 갖게 되고, 그 결과 아래 제약식의 작용에 의해 선석 이동을 나타내는 변수가 $Z_{K1.1.1.4}=1, Z_{K1.5.2.4}=0$ 으로 정해짐을 확인할 수 있다.

$$X_{K1.5.2.4} - X_{K1.5.2.3} \leq Z_{K1.5.2.4},$$

$$X_{K1.1.1.4} - X_{K1.1.1.3} \leq Z_{K1.1.1.4},$$

식 (7)은 합정 s 가 선석 p 의 정박위치 n 에 정박하고 있을 때 합정 s 보다 길이가 적은 다른 합정 σ 는 선석 p 의 정박위치 n 보다 내측(m)에 정박할 수 없다는 것을 나타낸다. 식 (8)은 무장 작업을 필요로 하는 합정 s 는 무장 선석에서 단일 계류해야 한다는 것을 나타낸다. 식 (9)는 포 배철을 필요로 하는 합정 s 는 포 배열 서비스를 지원하는 선석 최 외측에 계류해야 한다는 것을 나타낸다. 식 (10)은

합정 s 의 정박은 선석 p 의 정박위치 내측부터 순차적으로 이루어진다는 것을 나타낸다. 식 (11)은 합정 s 가 필요로 하는 서비스를 선석에서 제공받았는지 여부를 나타내는 결정 변수 U_{sq} 을 정해준다.

식 (12), (13)은 한국적인 현실상황을 반영하기 위해서 본 연구에서 새롭게 추가된 제약이다. 식 (12)는 긴급수리, 유류수급, 무장작업등과 같은 서비스는 특정 선석에서 지원 받을 수 있으며, 이러한 서비스는 일정 시간 안에 종료되기 때문에 이에 대한 제약을 나타내는 식이다. 즉, 앞에서 언급한 서비스들을 필요로 하는 합정에 대해 하루 이상 해당 선석에 정박하지 못하게 하는 시간적 제약을 나타낸다. 위의 서비스들을 필요로 하는 합정은 다음과 같은 선석 서비스들(일부 또는 전부)을 필요로 한다. 긴급수리의 경우는 유류수급, 태세유지, 탄약적재, 부식작업 서비스, 유류수급의 경우는 태세유지, 탄약적재, 부식작업 서비스, 무장작업의 경우는 유류수급, 수리, 크레인, 포 배열 서비스 등을 필요로 한다. 식 (13)은 합정의 상태에 따라 필요한 선석 서비스들이 있는데 이들 간에 전후관계를 나타낸다. 서비스 집합 L_1, L_2, L_3 는 서비스의 전후관계를 고려하기 위해서 구분한 것인데, 합정 s 가 L_1, L_3 의 서비스를 필요로 할 때 L_1 서비스를 먼저 받고 L_3 서비스를 다음에 받도록 하는 제약식이다. 예를 들면, 임무 수행 가능한 합정 s 가 L_1 에 속하는 긴급수리와 L_3 에 속하는 태세유지 서비스를 필요로 할 때, 합정 s 는 긴급수리 서비스를 먼저 받은 다음 태세유지 서비스를, 임무 불가능 전환 단계에 있는 합정 s_1 이 L_2 에 속하는 무장작업과 L_3 에 속하는 수리 서비스를 필요로 할 때 무장작업을 먼저 받은 다음 수리 서비스를 받을 수 있도록 하는 것이다. 이상의 식 (12), (13)을 통해서 서비스 지속 기간이 제한적이고 서비스들 간 전후 우선순위가 존재하는 현실 상황을 잘 반영해 줄 수 있었다.

식 (14), (15), (16)은 결정 변수들이 0과 1중 한 가지 값을 갖도록 하는 이진 변수 제약식이다.

3.4 OPL 프로그래밍

앞서 소개한 혼합 정수 계획 모형을 ILOG OPL Studio 3.1으로 구현하고 ILOG CPLEX 7.0으로 최적 해를 구해 보았다 (ILOG, 1999). OPL은 최적화 모델링 언어로서 수학 모형의 변수, 상수, 목적함수 그리고 제약식 등을 자연스런 대수학 기수법을 통해 정의해 줌으로써 매우 복잡한 수학적 수학적 모형을 비교적 간단한 프로그램으로 구현할 수 있게 한다. 또한 수학적 모형을 데이터 부분으로 나누어 표현함으로써, 모델의 구조가 확정되면 데이터만 반복적으로 수정해서 활용하는 경우에 매우 적합하다고 할 수 있다. Fig. 3은 3.3절에서 소개한 수리모형을 OPL프로그램으로 구현한 것의 일부를 보여주고 있다.

```

maximize // 목적함수 (1)
sum (s in Ships, p in Piers, n in Nestingpositions, t in Times)
  (sum(q in Services) OnOff_Ships[s,t]*M[s,q]*OnOff_Ships_Services[s,q]*(t*exp(t/7))
  +2[s,p,n,t] - 50[A,s] + 2[S,p,n,t]) - sum (s in Ships, q in Services) M[s,q] * U[s,q]
subject to
forall(p in Piers, t in Times) // 목적 (2)
  sum (s in Ships) (SD[0,s] + BW) * OnOff_Ships[s,t] * X[s,p,t] <= PD[0, p] * EX;
forall(p in Piers, t in Times) // 목적 (3)
  sum (s in Ships, n in Nestingpositions) OnOff_Ships[s,t]*50[1,s] * X[s,p,n,t] <= PD[1, p];
forall(s in Ships, t in Times) OnOff_Ships[s,t] <= 1; // 목적 (4)
sum (p in Piers, n in Nestingpositions) OnOff_Ships[s,t] * X[s,p,n,t] <= 1;
forall(p in Piers, n in Nestingpositions, t in Times) // 목적 (5)
  sum (s in Ships) OnOff_Ships[s,t] * X[s,p,n,t] <= 1;
forall(s in Ships, p in Piers, n in Nestingpositions, t in Times : t>50[5,s]) // 목적 (6)
  OnOff_Ships[s,t]*X[s,p,n,t]-OnOff_Ships[s,t]*X[s,p,n,t-1] - 2[s,p,n,t] <= W;
  
```

Fig. 3 OPL Model

이상의 OPL 프로그램을 활용한 경우 선석 할당 계획의 수립 절차는 Fig. 4와 같다.

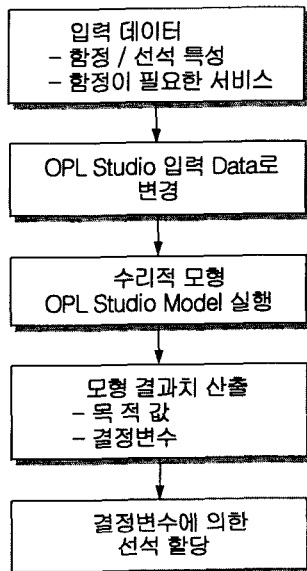


Fig. 4 Berth Allocation Process using MIP Model

4. 모형 적용 및 분석

4.1 문제의 구성 및 모형 실행

본 연구에서 제안한 수리적 모형을 적용하기 위해 현실 상황을 가정한 예제를 적용했다. 전체기간은 함정이 일반적으로 선석에 머무르는 기간인 7일, 해군 함정 수 16척, 선석 수 8개로 가정했다. 다음의 Table 5-7은 원시 입력 데이터로서 해군 함정에 관한 정보, 각 함정이 필요한 서비스에 대한 중요도, 그리고 각 선석별 제한과 지원 가능 서비스에 관한 입력 자료이다.

Table 5에서 함정의 숫자 앞에 표시된 첫 영문은 함정의 유형을 나타낸다. (K:구축함, F:호위함, A:군수 지원함, PM:미사일을 장착한 초계함 P:초계함) Table 6에서 P5함은 무장작업과 포 배열 서비스를 필요로 한다. 이 때문에 가정에서 언급한 바와 같이 단일계류, 최 외측 계류해야 한다.

Table 5 Input Data for each Vessel

함정	길이	전원 케이בל 수	입항일	출항일	단일 계류 여부	최외측 계류 여부	선석 이동 별점
K1	130	1	3	5	No	No	6
F2	100	1	1	3	No	No	5
F3	100	1	4	5	No	No	5
PM 4	90	1	2	4	No	No	3
P5	90	1	1	5	Yes	Yes	2
P6	90	1	0	3	No	No	2
K7	130	1	0	5	No	No	6
A8	130	1	0	2	No	No	4
P9	90	1	0	1	No	No	2
P10	90	1	0	2	No	No	2
F11	100	1	2	5	No	No	5
P12	90	1	1	4	No	No	2
F13	100	1	3	5	No	No	5
K14	130	1	2	5	Yes	No	6
A15	130	1	1	5	No	No	4

Table 6 Service Priorities for each Vessel (LQ_{sq})

구분	긴급 수리	유류 수급	무장 작업	크레인 작업	태세 유지	수리	포배열	탄약 적재	부식 작업
K1	94	-	-	-	48	-	-	-	-
F2	-	33	-	-	40	-	-	16	-
F3	-	33	-	-	40	-	-	-	-
PM4	-	-	-	-	24	-	-	-	-
P5	-	-	10	-	-	-	7	-	-
P6	-	-	-	-	16	-	-	-	-
K7	-	-	-	26	-	13	-	-	-
A8	-	-	-	-	-	-	-	-	4
P9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P10	-	13	-	-	-	-	-	6	-
F11	-	33	-	-	40	-	-	-	-
P12	-	13	-	-	-	-	-	-	2
F13	-	-	-	-	40	-	-	16	-
K14	-	-	30	-	-	13	-	-	-
A15	-	-	-	17	-	9	-	-	-

Table 6은 Table 4의 함정 유형/서비스별 중요도를 기반으로 개별 함정별 서비스에 대한 중요도 값을 정한 것이다. 예를 들어, 구축함 K1은 긴급수리와 태세유지를 필요로 하는데, 이에 대한 중요도는 Table 4의 구축함에 대한 중요도 값으로부터 정해진다.

최근 항만 내 선석은 현대화에 따라 다양한 기능을 제공하고 있다. 표 7에서 선석의 지원 서비스들을 살펴보면 선석의 기능이 단순화된 것처럼 보이겠지만, 긴급수리, 수리, 크레인, 무장작업과 같은 서비스는 특정 선석에서만 지원 가능한 서비스들이다.

Table 7 Input Data for each Berth

선석	길이	전원 케이블수	긴급 수리	유류 수급	무장 작업	3패 작업	태세 유지	수리	포 배열	탄약 적재	부식 작업
1	150	3	No	No	No	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes
2	150	3	No	No	No	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes
3	150	3	No	No	Yes	No	No	No	No	No	No
4	150	3	No	Yes	No	No	No	No	No	No	No
5	150	3	No	Yes	No	No	No	No	No	No	No
6	150	3	Yes	No	No	Yes	No	Yes	No	No	No
7	150	3	Yes	No	No	Yes	No	Yes	No	No	No
8	150	3	No	No	No	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes

위의 Table 5 - 7의 원시 입력 데이터를 OPL Studio의 데이터 파일로 변경한 것은 아래 Fig. 5와 같다.

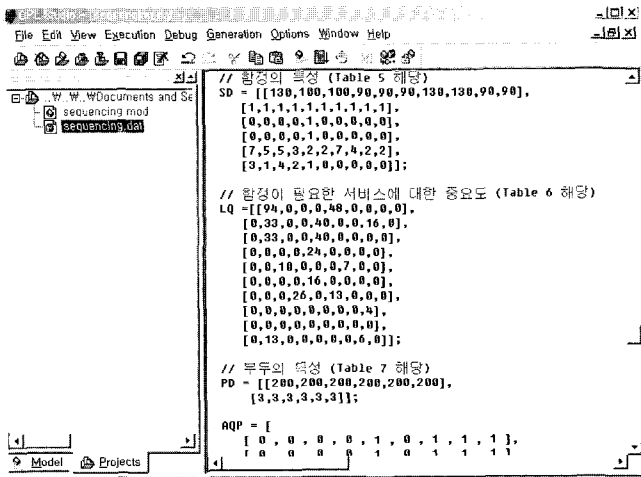


Fig. 5 OPL Studio Data file

4.2 선석 할당 결과

모형에서 고려되는 선석의 형태는 Fig. 6과 같으며, 선석 내에 있는 함정은 현재(t=0)의 위치를 나타낸다.

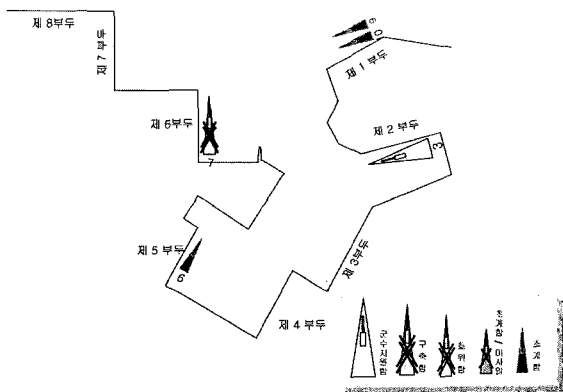


Fig. 6 Schematic Map of a Naval Base

Table 8은 모형에 의한 선석 할당과 실무자의 수작업에 의한 선석 할당 결과를 보여주며, 실무자의 수작업에 의한 선석 할당은 아래와 같은 원칙에 의해 이루어진다.

- 첫째, 함정이 필요한 서비스와 요청한 선석을 확인한다.
- 둘째, 함단 내 머무르는 함정 및 계류 가능 선석을 확인한다.
- 셋째, 함정이 불필요한 선석 이동을 최소화하고 필요한 서비스를 받을 수 있도록 선석을 지정해준다.

Table 8 Berth Allocation Results (▷ : 입항일, ▶ : 출항일)

일차 (t)	MIP 모형		실무자의 수작업	
	위치(s, p, n)	선석이동 (s, p, n)	위치(s, p, n)	선석이동 (s, p, n)
1	▷(F2, 4, 1) ▷(P5, 3, 1) (P6, 1, 1) (K7, 6, 1) (A8, 2, 1) (P9, 1, 2)▶ (P10, 4, 2) ▷(P12, 5, 1) ▷(A15, 6, 2)	(P6, 1, 1) (P10, 4, 2)	▷(F2, 5, 1) ▷(P5, 3, 1) (P6, 8, 1) (K7, 6, 1) (A8, 2, 1) (P9, 1, 1)▶ (P10, 4, 1) ▷(P12, 4, 2) ▷(A15, 7, 1)	(P6, 8, 1) (P10, 4, 1)
2	(F2, 8, 1) ▷(PM4, 8, 3) (P5, 8, 2) (P6, 1, 1) (K7, 6, 1) (A8, 2, 1)▶ (P10, 2, 2)▶ ▷(F11, 5, 1) (P12, 2, 3) ▷(K14, 3, 1) (A15, 6, 2)	(F2, 8, 1) (P5, 8, 2) (P10, 2, 2) (P12, 2, 3)	▷(F2, 2, 2) ▷(PM4, 1, 1) (P5, 1, 2) (P6, 8, 1) (K7, 6, 1) (A8, 2, 1)▶ (P10, 8, 2)▶ ▷(F11, 5, 1) (P12, 8, 3) ▷(K14, 3, 1) (A15, 7, 1)	(F2, 2, 2) (P5, 1, 2) (P10, 8, 2) (P12, 8, 3)
3	▷(K1, 6, 3) (F2, 8, 1)▶ (PM4, 8, 3) (P5, 8, 2) (P6, 1, 1)▶ (K7, 6, 1) (F11, 2, 2) (P12, 2, 3) ▷(F13, 2, 1) (K14, 7, 1) (A15, 6, 2)	(F11, 2, 2) (K14, 7, 1)	▷(K1, 6, 2) (F2, 2, 1)▶ (PM4, 1, 1) (P5, 1, 2) (P6, 8, 1)▶ (K7, 6, 1) (F11, 2, 2) (P12, 8, 2) ▷(F13, 2, 3) (K14, 7, 2) (A15, 7, 1)	(F2, 2, 1) (F11, 2, 2) (P12, 8, 2) (K14, 7, 2)
4	(K1, 8, 1) ▷(F3, 4, 1) (PM4, 8, 3)▶ (P5, 8, 2) (K7, 6, 1) (F11, 2, 2) (P12, 2, 3)▶ (F13, 2, 1) (K14, 7, 1) (A15, 6, 2)	(K1, 8, 1)	▷(K1, 8, 1) ▷(F3, 4, 1) (PM4, 1, 1)▶ (P5, 1, 2) (K7, 6, 1) (F11, 2, 1) (P12, 8, 2)▶ (F13, 2, 2) (K14, 7, 2) (A15, 7, 1)	(K1, 8, 1) (F11, 2, 1) (F13, 2, 2)
5	(K1, 8, 1)▶ (F3, 2, 3)▶ (P5, 8, 2)▶ (K7, 6, 1)▶ (F11, 2, 2)▶ (F13, 2, 1)▶ (K14, 7, 1)▶ (A15, 6, 2)▶	(F3, 2, 3)	(K1, 8, 1)▶ (F3, 8, 2)▶ (P5, 1, 1) (K7, 6, 1)▶ (F11, 2, 1)▶ (F13, 2, 2)▶ (K14, 7, 2)▶ (A15, 7, 1)▶	(F3, 8, 2) (P5, 1, 1)

Table 8과 Fig 6의 함정별 현재 위치 그리고, Table 5의 함정별 입·출항 일자 정보를 통해 각 함정의 이동 상황을

과약할 수 있다. Table 8에서 t=1 시점인 경우, 모형에 의한 결과에서는 P6함이 전날(t=0) 5선석의 정박위치 1에서 1선석의 정박위치 1, P10함은 1선석의 정박위치 1에서 4선석의 정박위치 2로 2회의 선석이동을 하였으며, 실무자에 의한 수작업에서는 t=1 시점에 P6, P10함이 각각 8선석의 정박위치 1, 4선석의 정박위치 1로 선석이동을 한다는 것을 알 수 있다.

문제를 해결하는데 걸린 시간은 펜티엄 4, CPU 1.8 GHz, RAM 256 MB 사양의 PC에서 4분 이내로 매우 짧은 시간에 최적 해를 구할 수 있었다. 모형과 수작업에 의한 선석 할당 모두 해군 함정이 필요로 하는 모든 서비스를 충족시키지만 전체적으로 결과 값에서 큰 차이가 난다. 모형 수행을 통한 목적 값이 856으로 실무자에 의한 수작업에 의한 목적 값, 837 보다 더 크고 선석이동도 5회가 적은 것으로 나타났다. 따라서 현재 실무자가 경험에 의존하여 수행하고 있는 수작업 보다 효율적으로 해군 함정의 선석 할당 계획을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 해군 함정이 각종 임무(경비, 훈련, 각종 지원)를 수행하고 모항에 머무르는 기간동안 차기 임무를 수행하기 위해 갖춰야 할 서비스를 우선순위와 전후관계에 따라 선석에 할당을 해주는 수리적 모형을 제시하였다. 효과적인 분석을 위하여 ILOG OPL Studio 3.1을 사용하여 모델링 한 후 ILOG CPLEX 7.0으로 최적해를 구해 보았다. 본 연구에서는 긴급수리, 유류수급, 무장작업과 같은 서비스에 대한 시간적 제약, 서비스의 전후관계를 나타내어 주는 제약 식 (12), (13) 을 추가하여 구체화시킴으로써 서비스 우선순위를 포괄적으로 고려하여 선석 할당 계획을 수립한 Brown et al. (1994)의 방법을 한국 실정에 맞게 보완하여 제시하였다. 본 연구의 모형은 실제 해군 부대에 적용하지는 못하였으나 현실성 있는 가상의 문제에 적용하여 만족할 만한 결과를 얻었으며, 전문지식을 갖춘 해군 장교들로부터 가능성을 인정받았다. 본 연구에서 제시한 모형이 함정의 필요한 서비스, 입항, 출항과 같은 함정에 대한 정보가 빈번하게 수정되는 상황을 고려하기 위해서는 실시간 스케줄 관리를 위한 선석 입출항 자료관리 시스템이 구축되어야 한다. 이와 같은 시스템이 구축된다면, 본 연구에서 제시한 모형의 현실성을 확보할 수 있게 될 것이다. 또한 본 연구는 평시 상황일 경우의 선석 할당 문제를 다룬 것으로써, 전시 상황에 대해서는 향후 연구과제로 남겨놓기로 한다.

현재, 해군 함정의 선석 할당과 관련하여 국내에서 연구된 사례는 전무한 실정이다. 본 연구는 서비스의 시간적 제약, 전후 우선순위가 존재하는 한국 해군의 상황을 반영한 현실적인 선석 할당 모형이며, 국내 첫 시도라는데 의의를 찾을 수 있을 것이다.

감사의 글

모형 개발 및 수행에 사용된 ILOG 소프트웨어를 고려대학교에 기증해 주신 KSTEC에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 유재성, 김동희, 김봉선, 이창호 (1999), "인천항의 효율적 선석운영을 위한 실시간 의사결정지원 시스템 구축," 한국 항만학회, 13(2), pp. 1-9.
- [2] 대한민국 해군(2003), <http://www.navy.go.kr/public/p03.html>
- [3] Brown, G. G., Lawphongpanich, S. and Thurman, K. P. (1994), "Optimizing Ship Berthing," *Naval Research Logistics*, 41, pp. 1-15.
- [4] ILOG (1999), ILOG OPL Studio 3.1 User's Manual.
- [5] Imai, A., Nagaiwa, K., Chan, W. T. (1997), "Efficient planning of berth allocation for container terminal in Asia," *Journal of Advanced Transportation* 31, pp. 75-94.
- [6] Kim, K. H. and Moon, K. C. (2003), "Berth scheduling by simulated annealing," *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(6), pp. 541-560.
- [7] Lai, K. K. and Shih, K. (1992), "A study of container berth allocation," *Journal of Advanced Transportation*, 26(1), pp. 45-60.
- [8] Lim, A (1998), "The berth planning problem," *Operations Research Letters*, 22, pp. 105-110.
- [9] Papworth, B. (1988), "Prospective Commanding Officer Briefing Draft", Naval Station Norfolk, VA, June.
- [10] Saaty, T. I (1980), "The Analytic Hierarchy Process", McGraw- Hill Inc.
- [11] Thurman, K. P (1989), "Optimal Ship Berthing Plans, Masters Thesis", Naval Postgraduate School, Monterey, CA, March.

원고접수일 : 2003년 9월 29일

원고채택일 : 2003년 11월 21일