한국군사과학기술학회지 제13권 제5호, pp. 748～758, 2010년 10월

학술논문 해상 · 수중 부문

불확실성을 고려한 해군함정 선석 할당 방안

The Berth Allocation Method for the Navy Surface Vessels Considering Uncertainty

정 환 식* 이 재 영* 이 용 대**
Whan-Sik Jung Jae-Yeong Lee Yong-Dae Lee

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 and the uncertainty of the arrival and departure for each vessel. For an effective analysis, the model is implemented by ILOG OPL(Optimization Programming Language) Studio 6.0 and ILOG CPLEX 11.1., which shows a reasonable result.

Keywords : Berth Allocation, Precedence Relationships, Fleet Readiness

1. 서 론

선석 할당 문제는 일반적으로 항만에서 발생하는 계획문제 중의 하나로 특정한 접안조건에 따라 주어진 선석에 접안시킬 수 있는 선박을 결정하는 것이라고 할 수 있다. 일반적으로 접안하기 위한 조건은 선석과 함정의 데이터로 주어지는데, 이는 선석의 개수와 길이, 계획기간과 선박의 척수와 길이, 선박 도착예정시간, 접안시간, 화물의 종류 등을 의미한다[1]. 선석 할당 문제는 먼저 도착한 함정이 지연 없이 선석에 할당되기를 원하는 선사의 입장과 선석의 효율성을 높이기를 원하는 항만운영자간의 Trade-off 관계를 최대한 고려하는 것으로써 이해관계자들의 입장을 최대한 포함할 수 있는 최적 선석 할당 방안이 필요하다[3].

선석 할당 문제는 화물 적재/하역을 주 임무로 하는 민간 항만과는 다르지만 해군 부대에 있어서도 중요한 역할을 담당한다. 이는 전비태세 유지에 일익을 담당하고 있다. 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 최고도의 전비 태세를 유지시키는 것을 주 목적으로 한다. 한편, 각 선석은 함정이 필요로 하는 모든 서비스를 일괄적으로 제공하는 대신 선석의 특성에

† 2010년 6월 9일 접수～2010년 7월 28일 게재승인
* 국방대학교 운영분석학과
** 현대 모비스
책임저자 : 정환식(jung896@naver.com)

따라 각기 다른 서비스를 한정적으로 지원할 수 있다[18]. 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 고려한 가운데 불필요한 선석이동까지 최소화한 최적의 선석 할당 계획을 수립하는 것은 어려운 문제이며, 함정 및 부두의 규모가 커질수록 더욱더 복잡해진다.

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 수립하는 것을 목적으로 한다. 이때 향후 입항 또는 출항 예정인 함정의 입출항 일자의 불확실성을 고려하여 선석할당 계획을 제시하고자 한다. 즉, 현실세계에서 빈번히 발생하는 불확실성을 고려함으로써 보다 합리적이고 현실적인 선석 할당 계획을 제시하고자 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 6.0으로 구현하였다[22]. 제 4절에서는 기존의 연구결과와 차이점을 비교 분석하였으며, 제 5절에서는 연구의 성과 및 기대 효과, 그리고 향후 연구 방향에 대해 간략하게 서술하였다.

2. 관련 연구 고찰

가. 일반적인 선석 할당 절차

민간 항만의 한 예로 인천항의 일반적인 선석 할당 절차를 살펴보면 다음과 같다.

입항하고자 하는 선박이 항만 사용허가 신청을 하면 선석회의를 통해 사용할 선석을 정한 후 통보하여 준다. 선석을 할당하는 작업은 입항하는 선박에 대한 입항시간 및 특성 등의 정보가 얼마나 충분히 항만 운영주체에게 제공되는가에 크게 영향을 받는다[5].

해군 함정의 선석 할당 절차는 해상에서 임무를 수행중인 해군 함정이 상급부대로부터 복귀명령을 받으면 임무를 교대하고 모항에 입항하기 전 사용 선석을 상급 부대에 요청하여 선석을 할당받으며, 항만 운영 실무자는 모항 상황과 함정의 상태를 고려하여 선석을 할당한다.

나. 기존 연구 고찰

민간 항만의 선석 할당에 관한 연구로는 국내외 많은 사례를 찾아 볼 수 있다. Lai *et al.*[16]은 컨테이너선에 대한 여러 가지 선석 할당 정책을 시뮬레이션 실험을 통해서 비교했으며, Lim[17]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.*[13]은 비열등해(Non-inferior solution)를 찾기 위한 휴리스틱 알고리즘을 개발했다. 유재성 등[5]은 인천항에 대해 전문가의 경험적인 지식을 이용한 배정규칙에 따라 선석 할당을 수립할 수 있는 지식기반 실시간 의사결정지원시스템을 구축하였다. *Kim et al.*[15]은 문제의 규모가 커서 최적해를 구하기 어려운 컨테이너선의 선석 할당 문제에 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)기법을 이용한 발견적 방법으로 최적해와 근사한 값을 제시하였다.

홍동희[9]는 유전자 알고리즘과 시뮬레이션을 통해 터미널에서의 선석계획과 야드 설계의 통합에 대해 연구하였다. 정다훈 등[6]은 일반부두와 양현부두의 본선작업 완료시간 비교를 위해 GRASP(Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) 기법을 적용한 안벽크레인 일정계획 알고리즘을 연구한 바 있다. *Wang et al.*[21]은 선석할당 문제에 대한 새로운 다 국면(Multiple Stage) 탐색기법으로 확률적 빔 탐색 알고리즘(Stochastic Beam Search Algorithm)을 개발하였다. *Imai et al.*[14]은 메가-컨테이너 선박의 빠른 서비스를 위해 다중 사용자 컨테이너 터미널에서의 선석할당 문제를 정수계획법과 유전자 알고리즘을 적용하여 연구하였다. *Hansen et al.*[12]은 선석할당에 있어서의 비용 최소화를 위해 다중 이웃탐색(Variable Neighborhood Search) 기법을 개발하여 기존 연구결과와 비교하였다.

해군 함정의 선석 할당과 관련해서는 *Brown et al.*[10]

과 Thurman[20]이 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. 또한, *Brown et al.*[11]은 잠수함 부두에서 기본 계획의거 선석할당이 수립된 이후 함 일정 및 선석 위치 변경 시 기존에 승인된 계획을 최대한 고려할 수 있는 모형을 제시하였다. 정환식 등[7]은 해군함정이 각종 훈련, 경비임무를 수행한 후 모항에 머무르는 동안 차기 임무를 준비하기 위해 구비해야 할 서비스를 우선순위와 전후관계를 고려하는 선석할당 문제를 연구하였다.

원현식 등[4]은 해군함정이 필요한 서비스를 받기 위해 부두에 입항 시 입항하는 모든 함정이 최단시간 내 요구 서비스를 마치고 다시 전비태세를 유지토록 서비스 완료시간을 최소화함으로써 함정 가동률을 최대화 할 수 있도록 선석할당 문제를 연구하였다.

정환식 등[8]은 서비스를 우선순위와 전후관계를 고려하여 선석을 할당하는 기존 연구(정환식 등[7])를 기반으로 현실에서 자주 발생할 수 있는 함 일정 및 서비스 등이 변경되더라도 최초 선석 할당 결과를 고려하는 수리모형을 제시하였다.

본 연구에서는 정환식 등[7,8]의 연구에서 고려하지 못한 함정의 입출항 일정의 불확실성을 고려하여 계획변경에 따른 비효율을 최소화 할 수 있는 선석할당 모델을 제시하고자 한다.

3. 수리모형 수립

가. 문제정의

본 연구에서는 해군 함정의 전비태세 향상을 위한 선석 할당 모형을 개발하는 것을 목적으로 한다. 선석 할당 모형은 해군 함정이 해상에서 임무를 종료하고 모항에 입항하여 필요한 서비스 등을 충족하기 위해 언제 어느 선석에 할당 되어야 하는가를 결정하는 모형으로써, 제한된 선석과 설비자원, 서비스 전후의 우선순위를 고려하여야 한다. 이때 선석은 함정이 정박 가능한 곳으로써 일반적으로 3척까지 정박할 수 있다. 또한 불필요한 선석 이동을 최소화 하여야 한다. 그리고 현재는 입항 일정이 확정되지 않았지만 앞으로 입항할 확률이 있는 선박의 선석 할당 여부도 고려하여야 한다. 만약 입항할 확률이 있는 함정에 대해서 선석 할당을 고려하지 않았는데 입항하게 되면 전비태세 유지를 위해 수립된 기존의 계획이 변경되어야 하며 실질적 선석이동이 증가하게 된다.

모형에서 고려되는 선석의 형태는 Fig. 1과 같으며, 선석 내에 있는 함정은 현재(t=0)의 위치를 나타낸다. 그리고 선석에서 점선으로 표시된 부분은 해당위치에 함정이 정박할 수 있는 가용 선석을 나타낸다.

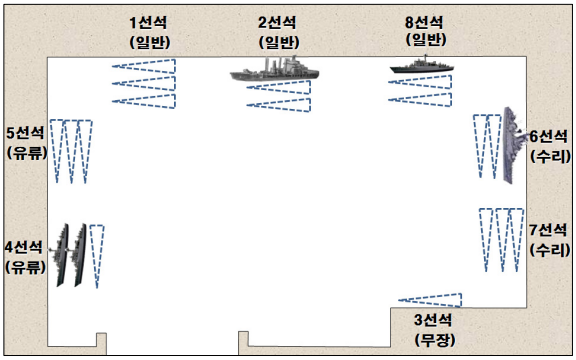

Fig. 1. 해군 항만 구성도

해상에서 임무를 종료하고 모항에 입항하는 함정은 차기 임무를 위해 각 선석에서 받아야 하는 서비스와 정박할 수 있는 환경과 조건이 정해져 있다. 일반적으로 각 함정이 정박할 수 있는 선석의 조건은 다음과 같다.

1) 각 함정은 자신의 길이보다 긴 선석에 정박 할 수 있다.
2) 각 선석에는 3척 이상의 함정이 정박할 수 없다. (단, 무장선석 제외)
3) 동일한 함정이 같은 시점에 다른 선석에 중복될 수 없다.
4) 무장선석에서는 안전을 위해 한 척만의 함정이 정박할 수 있다.
5) 포 배열 서비스를 필요로 하는 함정은 선석에서 최외측에 계류해야 한다.
6) 동일한 선석에 정박하는 순서는 내측부터 순차적으로 이루어진다.(nesting position 1, 2, 3 순)
7) 긴급수리, 유류수급, 무장작업 등과 같은 서비스는 일반적으로 하루 안에 종료된다.

한편, 해군 선석에서 지원하는 서비스는 다음과 같이 9개로 분류할 수 있다.

- 긴급수리
  임무수행(경비, 훈련, 각종지원)중 갑작스런 장비고장 발생 시 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
  훈련을 위해 필요한 탄약을 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 상태에 따라 필요한 서비스를 받는데 Table 1은 이를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 1. 함정의 상태에 따른 필요 서비스

함정의 상태	필요 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)	유류수급, 무장작업, 포배열

본 연구에서는 함정 유형/서비스별 중요도를 정하기 위해서 정환식 등의 기존연구[7] 결과를 인용하여 Table 2와 같이 적용하였다. Table 2는 의사결정 참여자의 직관에 의한 평가 결과를 정량화할 수 있는 Saaty[19]의 AHP(Analytic Hierarchy Process)기법과 전문가들의 인터뷰 결과이다.

Table 2. Service Priorities/Penalties for each Type of Vessels[7]

함정	긴급수리	유류수급	무장작업	크레인작 업	태세유지	수리	포 배열	탄약적재	부식작업	선석이동벌점
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

나. 기존연구와의 차이점

기존의 연구는 확정적인 함정의 입력 자료를 기반으로 선석할당을 했으나, 본 연구는 함정의 입출항 정보에 대해 확률 값을 부여함으로써 불확실성을 고려한 선석할당 계획을 수립할 수 있도록 하였다. 확률 값을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 계획과 실제 운영 결과를 예를 들어 설명하면 Fig. 2~Fig. 5와 같다. Fig. 2와 Fig. 4는 특정한 날짜에 긴급 수리를 요하는 배가 있을 수 있다는 확률을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 선석할당 계획이며, 다음 두 가지 시나리오가 현실화 되었을 때의 결과는 Fig. 2~Fig. 5와 같다.

1) Scenario 1 : A 함정이 긴급 수리를 요하지 않아 입항하지 않는 경우
2) Scenario 2 : A 함정이 2일째 긴급 수리가 필요하여 입항한 경우

먼저 Fig. 2는 확률 값을 고려하지 않고 Scenario 1과 같이 확정적인 정보만을 고려하여 계획을 수립했을 때의 선석 할당 계획으로써 기존연구[7]에서 제시한 계획과 같으며, Scenario 1이 실현되었을 때의 실제 선석 운영 결과이기도 하다.

구분	0	1	2	3	4	5	선석이동
대기	B						2회
대기							
수리	C	C	B	B	B	B	
무장		B					

Fig. 2. 불확실성 미고려시 Scenario 1의 선석할당 결과

구분	0	1	2	3	4	5	선석이동
대기	B		B				3회
대기							
수리	C	C	A	B	B	B	
무장		B					

Fig. 3. 불확실성 미고려시 Scenario 2의 선석할당 결과

구분	0	1	2	3	4	5	선석이동
대기	B	B					2회
대기							
수리	C	C	A	B	B	B	
무장			B				

Fig. 4. 불확실성 고려시 Scenario 2의 선석할당 결과

구분	0	1	2	3	4	5	선석이동
대기	B	B					2회
대기							
수리	C	C		B	B	B	
무장			B				

Fig. 5. 불확실성 고려시 Scenario 1의 선석할당 결과

Fig. 3은 확정적인 정보만을 고려한 선석할당 계획을 갖고 Scenario 2가 실현되었을 때의 실제 선석 운영 결과이다. 이때 계획은 매 기간 초에 Update 된다는 가정을 할 수 있다. Fig. 4는 Scenario 1과 Scenario 2가 모두 실현될 수 있는 가능성을 고려하여 기댓값이 최대가 되는 선석할당 계획을 수립한 결과와 Scenario 2가 실현되었을 때의 실제 선석 운영 결과이다. 마지막으로 Fig. 5는 Scenario 1과 Scenario 2가 모두 고려한 계획을 기초로 Scenario 1이 실현 되었을 때의 결과를 의미한다. 기존 연구는 Fig. 2, Fig. 3과 같이 한 가지 시나리오만을 고려하여 계획을 수립함으로써, 다른 시나리오가 발생할 경우 Fig. 3과 같이 선석 이동의 횟수도 증가하고, 2번째 기간에 함정 B의 경우처럼 무장을 해제한 채 대기하여 전비 태세를 갖추지 못하는 경우도 발생하게 된다. 반면 본 연구의 방향인 확률 값을 이용하여 가능한 시나리오를 모두 고려하는 방법은 Fig. 4, Fig. 5와 같이 어떤 시나리오가 발생하더라도 전비 태세를 최대로 유지 할 수 있도록 한다.

다. 가정사항

- 선석의 수심은 함정의 홀수(함정이 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.

라. 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 s의 특성치(함정 s의 길이, 전원케이블 수, 입항일, 출항일, 단일 계류여부, 최 외측 계류 여부, 선석이동 벌점)
- PD_{pa} : 선석 p의 특성치(선석 p의 길이, 전원케이블 수)
- WP : 무장선석의 집합
- GP : 포 배열 선석의 집합
- O : {긴급수리, 유류수급, 무장작업}과 같이 하루 안에 종료되는 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
- Ω(s) : 함정 s 보다 길이가 적은 함정의 집합
- $\phi(q)$: 서비스 q를 지원하는 선석의 집합
- $\pi(q)$: 서비스 q를 필요로 하는 함정의 집합
- NONEST : 단일 계류를 해야 하는 함정의 집합
- NOOUT : 최 외측 계류를 해야 하는 함정의 집합
- LQ_{sq} : 함정 s가 필요로 하는 서비스 q에 대한 중요도
- A_{qp} : 서비스 q가 선석 p에서 가능하면 1, 그렇지 않으면 0
- T_{st} : 함정 s가 t시점에 입항할 확률이 0보다 크면 1, 그렇지 않으면 0

- SV_{sq} : 함정 s가 서비스 q를 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 t에 계류함으로써 생기는 점수
- H_{sq} : 함정 s가 서비스 q를 받지 못함으로써 생기는 벌점
- P_{st} : 함정 s가 t 시점에 입항할 확률
- CP_{st} : 입항한 함정 s가 선석이 할당되지 않으면 생기는 벌점

■ 결정 변수(Decision Variable)

- X_{spnt} : 함정 s가 t 시점에 선석 p의 정박위치 n에 계류하면 1, 그렇지 않으면 0 (T_{st}=1 경우에만 X_{spnt}가 포함)
- Z_{spnt}: 함정 s가 t 시점에 선석 p의 정박위치 n으로 이동하면 1, 그렇지 않으면 0
- U_{sq} : 함정 s가 필요한 서비스 q를 받지 못하면 1, 그렇지 않으면 0
- Y_{st} : 입항한 함정 s가 t 시점에 선석이 할당되지 않으면 1, 그렇지 않으면 0

■ 수리 모형

$$\text{Max} \sum_{spnt} P_{st} BN_{spnt} X_{spnt} - \sum_{spnt} P_{st} SD_{s.penalty} Z_{spnt} - \sum_{sq} H_{sq} U_{sq} - \sum_{st} P_{st} CP_{st} Y_{st} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{pn} X_{spnt} + Y_{st} = T_{st}, \forall s,t, \quad (2)$$

$$\sum_{s} (SD_{s.length} + BTW) X_{sp1t} \leqq PD_{p.length} + EXT, \forall p,t, \quad (3)$$

$$\sum_{sn} SD_{s.power} X_{spnt} \leqq PD_{p.power}, \forall p,t, \quad (4)$$

$$\sum_{pn} X_{spnt} \leqq 1, \forall s,t, \quad (5)$$

$$\sum_{s} X_{spnt} \leqq 1, \quad \forall p,n,t, \quad (6)$$

$$X_{spnt} - X_{spn(t-1)} - Z_{spnt} \leqq 0, \quad \forall s,p,n, and\, t > SD_{s.arrive} \quad (7)$$

$$\sum_{\sigma \in \Omega(s)} \sum_{m<n} X_{\sigma pmt} + (n-1) X_{spnt} \leqq (n-1), \quad \forall s,p,t, \text{and} n \geqq 2, \quad (8)$$

$$\sum_{m} \sum_{\sigma \neq s} X_{\sigma pmt} + N X_{sp1t} \leqq N, \quad \forall t \; and \; p \in WP, s \in NONEST \quad (9)$$

$$\sum_{\sigma \in \Omega(s)} \sum_{m>n} X_{\sigma pmt} + (N-n) X_{spnt} \leqq (N-n), \quad \forall t, \text{and} n \leqq (N-1), p \in GP, s \in NOOUT \quad (10)$$

$$\sum_{s} X_{spnt} - \sum_{s} X_{sp(n-1)t} \leqq 0, \; \forall p,t, \text{and} n \geqq 2, \quad (11)$$

$$\sum_{p \in \phi(q)} \sum_{nt} SV_{sq} X_{spnt} + U_{sq} \geqq 1, \quad \forall s,q, \quad (12)$$

$$\sum_{n} \sum_{t} X_{spnt} \leqq 1, \quad \forall s \in \pi(o), p \in \phi(o), q \in O, \quad (13)$$

$$T \sum_{n} \sum_{t'=1}^{t} X_{sp_1nt'} \geqq \sum_{n} \sum_{t'=1}^{t} X_{sp_2nt'}, \quad \forall p_1 \in \phi(q_1), p_2 \in \phi(q_2), \quad q_1 \in \{L_1, L_2\}, q_2 \in \{L_2, L_3\}, s \in \pi(q_1), t \geqq 1, \quad (14)$$

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

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

$$U_{sq} \in \{0,1\} \quad \forall s,p,n,t, \quad (17)$$

$$Y_{st} \in \{0,1\} \quad \forall s,p,n,t, \quad (18)$$

BN_{spnt}는 Table 4의 함정 유형과 서비스별 중요도를 기반으로 계산되며, 식은 (19)와 같다. 서비스 q를 필요로 하는 함정 s가 q를 지원하는 선석에 있으면 점수를 얻는다. 미래보다는 현재를 더 중요하게 반영하고 있으며, 모항에 머무르는 기간 동안 서비스 점수는 누적된다. 그러나 긴급수리, 유류수급, 무장작업, 크레인 작업과 같은 서비스는 하루 안에 끝나기 때문에 서비스 점수가 누적되지 않는다.

$$BN_{spnt} = e^{\left(\frac{-t}{T}\right)} \left(\sum_{q} LQ_{sq} A_{qp} \right) \quad (19)$$

목적함수는 식 (1)과 같다. 함정이 필요로 하는 서비스를 지원 선석에서 받음으로써 서비스를 점수화한 총점을 최대화, 선석이동으로 인한 함정의 선석이동

벌점을 최소화, 필요한 서비스를 받지 못함으로써 생기는 벌점이 최소화 및 입항한 함정이 선석이 할당되지 못할 때 생기는 벌점의 최소화로 구성되었으며, 선박이 입항할 확률을 곱하여 입항 확률이 높은 함정부터 선석과 서비스가 할당 될 수 있도록 하였다. 식 (2)는 함정 s의 t 시점 입항 확률이 0보다 크면 선석이 할당 될 수 있도록 구성하는 제약식으로써 Y_{st}는 입항한 함정의 선석이 할당 되었는지를 확인하기 위한 목표 계획법의 Slack 변수이다. 식 (3)은 선석 길이가 최 내측(nesting position=1)에 있는 함정 s의 길이보다 커야 된다는 것을 나타내며, 식 (4)는 선석에서 제공할 수 있는 전원케이블 수에 대한 제약을 나타낸다. 식 (5)는 시간 t시점의 함정 s는 다른 선석의 정박위치에 동시에 계류할 수 없다는 물리적인 제약에 해당된다. 식 (6)은 선석의 정박위치 마다 최대한 한 척의 해군 함정만을 수용한다는 것을 나타낸다. 식 (7)은 선석이동을 표시하는 변수 Z_{spnt}을 정해준다.

식 (8)은 함정 s가 선석 p의 정박위치 n에 정박하고 있을 때 함정 s보다 길이가 적은 다른 함정 σ는 선석 p의 정박위치 n보다 내측(m)에 정박할 수 없다는 것을 나타낸다. 식 (9)는 무장 작업을 필요로 하는 함정 s는 무장 선석에서 단일 계류해야 한다는 것을 나타낸다. 식 (10)은 포 배열을 필요로 하는 함정 s는 포 배열 서비스를 지원하는 선석 최 외측에 계류해야 한다는 것을 나타낸다. 식 (11)은 함정 s의 정박은 선석p의 정박위치 내측부터 순차적으로 이루어진다는 것을 나타낸다. 식 (12)는 함정 s가 필요로 하는 서비스를 선석에서 제공받았는지 여부를 나타내는 결정 변수 U_{sq}을 정해준다. 식 (13)은 긴급수리, 유류수급, 무장 작업등과 같이 하루 이내에 종료되는 서비스들에 대해 하루 이상 정박하지 못하게 하는 시간적 제약을 나타낸다. 식 (14)는 서비스의 전후 관계를 나타낸다. 서비스 집합 L_1, L_2, L_3는 서비스의 전후관계를 고려하기 위해서 구분한 것인데, 함정 s가 L_1, L_3의 서비스를 필요로 할 때 L_1서비스를 먼저 받고 L_3서비스를 다음에 받도록 하는 제약식이다. 예를 들면, 임무 수행 가능한 함정 s가 L_1에 속하는 긴급수리와 L_3에 속하는 태세유지 서비스를 필요로 할 때, 함정 s는 긴급수리 서비스를 먼저 받은 다음 태세유지 서비스를 받을 수 있도록 하는 것이다.

식 (15), (16), (17), (18)은 결정 변수들이 0과 1중 한 가지 값만을 갖도록 하는 이진 변수 제약식이다.

4. 모형 적용 및 분석

가. 문제의 구성 및 모형 실행

본 연구에서 제안한 수리적 모형을 적용하기 위해 현실 상황을 가정한 예제를 적용했다. 전체 기간은 7일, 해군 함정 수 15척, 선석 수 8개로 가정하였다.

앞서 소개한 혼합 정수 계획 모형을 ILOG OPL Studio 6.0으로 구현하고 ILOG CPLEX 11.1로 최적 해를 구해 보았다. OPL은 최적화 모델링 언어로서 수학 모형의 변수, 상수, 목적함수 그리고 제약식 등을 자연스런 대수학 기수법을 통해 정의해 줌으로써 매우 복잡한 수학식을 비교적 간단한 프로그램으로 구현할 수 있다. Fig. 6은 '3. 다'절에서 소개한 수리모형을 OPL프로그램으로 구현한 것의 일부를 보여주고 있다.

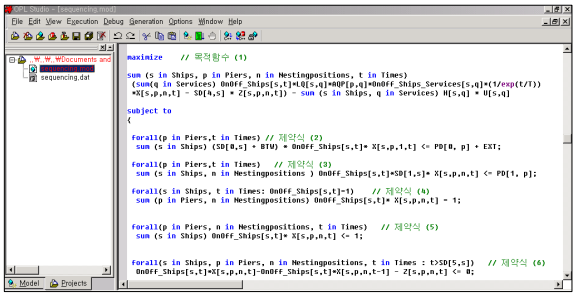

Fig. 6. OPL Model 구현(일부)

이상의 OPL 프로그램을 활용한 경우 선석 할당 계획의 수립 절차는 Fig. 7과 같다고 할 수 있다. 문제를 해결하는데 걸린 시간은 Dual-Core CPU 6420 2.13 GHz, RAM2GB 사양의 PC에서 수초 이내로 매우 짧은 시간에 최적 해를 구할 수 있었다.

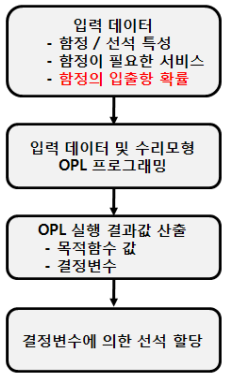

Fig. 7. 선석 할당 계획 수립 절차

나. 선석 할당 결과 및 분석

모형의 효과를 검증하기 위하여 정환식 등[7]의 확정론적 연구 결과와 본 논문에서 제시한 불확실성을 고려한 확률적 모형의 수행 결과를 비교하고, 확률적 모형의 효과를 검증하였다.

정환식 등[7]의 기존 연구에서 제시한 확정론적 모형의 수행 결과는 Table 3과 같고, 본 연구에서 제시한 확률적 모형의 수행 결과는 Table 4와 같다. Table 3과 Table 4를 살펴보면 각 날짜별로 각 선석에 정박된 함정의 이름을 확인할 수 있다. Table 4는 1/13번 함정(입항일)과 5/11번 함정(출항일)에 대해 불확실성을 고려하여 선석을 할당한 것이다. 불확실한 함정의 입출항 정보는 시간이 지남에 따라 정확한 정보를 얻을 수 있게 되는데 Table 3과 Table 4는 불확실성이 현실화 되었을 때의 경우를 고려한 것이다. 수행 결과를 비교해보면 Table 4는 Table 3보다 선석이동이 1회 적게 나타난 것을 볼 수 있다. Table 4의 선석이동은 모두 필요한 서비스를 받기위해 발생한 것이나, Table 3의 경우에는 불필요한 선석이동(1번 함정 : 3일에 5선석 할당)이 1회 발생하였다.

이는 미래의 불확실성을 고려하지 않고 계획을 수립하면 실제 불확실성이 예측과 달리 실현 되었을 때 비효율이 발생하게 되는 것이다.

즉, Table 4의 결과는 현실세계에서 자주 발생할 수 있는 함정의 입출항일의 불확실성을 고려함으로써 보다 합리적인 결과를 제시하여 준다고 할 수 있다.

Table 3. 불확실성 미고려시 선석할당 결과

구 분		0일	1일	2일	3일	4일	5일	6일	비 고
1선석	1-1	P10	**P6**	P6	P6	**K1**	K1		선석이동 4회 (P6, P10, P5, K1)
	1-2	P9	P9	**P5**	P5	P5	P5		
	1-3			**P10**					
2선석	2-1	A8	A8	A8	**F13**	F13	F13		선석이동 3회 (F2, F13, F3)
	2-2			F2	F2		**F3**		
	2-3								
3선석	3-1		P5	K14					
	3-2								
	3-3								
4선석	4-1		F2	F11		F3			
	4-2								
	4-3								
5선석	5-1	P6	P10		**K1**				선석이동 2회(P10, K1)
	5-2		P12						
	5-3								
6선석	6-1	K7	K7	K7	K7	K7	K7		
	6-2		A15	A15	A15	A15	A15		
	6-3								
7선석	7-1			K1	**K14**	K14	K14		선석이동 1회(K14)
	7-2								
	7-3								
8선석	8-1			F13	**F11**	F11	F11	F11	선석이동 3회 (P5, P12, F11)
	8-2			**P12**	P12	P12		**P5**	
	8-3			PM4	PM4	PM4			

Table 4. 불확실성 고려시 선석할당 결과

구 분		0일	1일	2일	3일	4일	5일	6일	비 고
1선석	1-1	P10	**P6**	F13	**K1**	K1	K1		선석이동 3회 (P6, P12, K1)
	1-2	P9	P9	**P12**	P12	P12			
	1-3			PM4	PM4	PM4			
2선석	2-1	A8	A8	A8	**F13**	F13	F13		선석이동 3회 (F2, F13, F3)
	2-2			**F2**	F2		**F3**		
	2-3								
3선석	3-1		P5	K14					
	3-2								
	3-3								
4선석	4-1		F2	F11		F3			
	4-2								
	4-3								
5선석	5-1	P6	**P10**						선석이동 1회(P10)
	5-2		P12						
	5-3								
6선석	6-1	K7	K7	K7	K7	K7	K7		
	6-2		A15	A15	A15	A15	A15		
	6-3								
7선석	7-1			K1	**K14**	K14	K14		선석이동 1회(K14)
	7-2								
	7-3								
8선석	8-1			**P10**	**F11**	F11	F11	F11	선석이동 4회 (P10, P5, P6, F11)
	8-2			**P5**	P5	P5	P5	P5	
	8-3			**P6**	P6				

5. 결 론

본 연구에서는 해군 함정이 각종 임무(경비, 훈련, 각종 지원)를 수행하고 모항에 머무르는 기간 동안 차기 임무를 수행하기 위해 갖춰야 할 서비스를 우선순위와 전후관계에 따라 선석을 할당하며, 함정의 입출항 일정의 불확실성을 고려하는 수리적 모형을 제시하였다. 모형의 해를 도출하기 위하여 ILOG OPL Studio 6.0을 사용하여 모델링 한 후 ILOG CPLEX 11.1로 최적해를 산출해 보았다.

본 연구에서는 긴급수리, 유류수급, 무장작업과 같은 서비스에 대한 시간적 제약, 서비스의 전후관계 등을 한국 실정에 맞게 보완한 기존의 연구를 기반으로 확률적인 요소를 추가적으로 고려하였다. 본 연구의 모형은 현실성 있는 가상의 문제에 적용하여 만족할 만한 결과를 얻었으며, 전문지식을 갖춘 해군 장교들로부터 가능성을 인정받았다.

시간과 자원관리는 민간에서 뿐만 아니라 해군 작전영역에서 중요한 비중을 차지하고 있으며, 효율적인 선석 할당은 함대 전비태세 유지에 있어 필수적이다. 한정된 선석과 설비 자원 하에서 함정이 증가하면, 고려해야할 요소가 많아진다. 이에 따라 실무자는 불필요한 선석 이동을 일으킬 수도 있을 것이다. 불필요한 선석이동을 방지하기 위해 본 연구를 기반으로 한 의사결정체계가 구축된다면, 전비태세 유지에 기여를 할 것이다.

본 연구에서는 각 함정의 입출항 정보에 대해 임의의 확률 값을 부여하였는데 실제 자료를 반영하여 적용한다면 보다 현실성을 확보할 것이다. 이는 향후 연구를 통해 보완할 것이다.

Reference

[1] 김대상, “선석할당 계획문제의 최적화에 관한 연구”, 석사학위논문, 한국해양대학교, 2000.

[2] 대한민국 해군(2009), http://www.navy.mil.kr/

[3] 이홍걸, 이철영, “발견적 알고리즘에 의한 컨테이너 터미널의 선석배정에 관한 연구”, 한국항만학회지, 9(2), pp. 1～8, 1995.

[4] 원현식, 안태호, 이상헌, “함정 가동률 최대화를 위한 선석할당문제”, 한국시뮬레이션학회지, Vol. 18, No. 2, pp. 19～27, 2009.

[5] 유재성, 김동희, 김봉선, 이창호, “인천항의 효율적 선석운영을 위한 실시간 의사결정지원 시스템 구축”, 한국항만학회지, 13(2), pp. 1～9, 1999.

[6] 정다훈, 박영만, 이병권, 김갑환, “컨테이너 터미널에서 일반부두와 양현부두의 본선작업 완료시간 비교 연구”, 한국경영과학회 학술대회 논문집, 제11호, pp. 336～345, 2006.

[7] 정환식, 김재희, 김승권, “서비스 전후 우선순위를 고려한 해군함정의 선석 할당에 관한 연구”, 한국항해항만학회지, 제28권, 제1호, pp. 83～90, 2004.

[8] 정환식, 이재영, “전비태세 일관성 유지를 위한 해군함정 선석 할당 방안”, 한국경영과학회 추계학술대회, 2009.

[9] 홍동희, “시뮬레이션과 유전자 알고리즘을 이용한 선석계획과 야드 설계의 통합”, 해운물류연구, 제44호, pp. 77～92, 2005.

[10] Brown, G. G., Lawphongpanich, S., Thurman, K. P., “Optimizing Ship Berthing”, Naval Research Logistics, 41, pp. 1～15, 1994.

[11] Brown et al., “Optimizing Submarine Berthing with a Persistence Incentive, Naval Research Logistics, 44, pp. 301～318, 1994.

[12] Hansen, P., Oguz, C., Mladenovic, N., “Variable Neighborhood Search for Minimum Cost Berth Allocation”, European Journal of Operational Research, 191(3), pp. 636～649, 2008.

[13] Imai, A., Nagaiwa, K., Chan, W. T., “Efficient Planning of Berth Allocation for Container Terminal in Asia”, Journal of Advanced Transportation, 31, pp. 75～94, 1997.

[14] Imai, A., Nishimura, E., Hattori, M., Papadimitriou, S., “Berth Allocacion at Indented Berths for Mega-Containerships”, European Journal of Operations Research, 179(2), pp. 579～593, 2007.

[15] Kim et al., “Berth Scheduling by Simulated Annealing”, Transportation Research Part B : Methodological, 37(6), pp. 541～560, 2003.

[16] Lai, K. K. and Shih, K., “A Study of Container Berth Allocation”, Journal of Advanced Transportation, 26(1), pp. 45～60, 1992.

[17] Lim, A., “The Berth Planning Problem”, Operations Research Letters, 22, pp. 105～110, 1998.

[18] Papworth, B., Prospective Commanding Officer Briefing Draft, Naval Station Norfolk, VA, 1988.

[19] Saaty, T. I., The Analytic Hierarchy Process, McGraw- Hill Inc, 1980.

[20] Thurman, K. P., “Optimal Ship Berthing Plans”, Masters Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1989.

[21] Wang, F., Lim, A., “A Stochastic Beam Search for Berth Allocation Problem”, Decision Support System, 42(4), pp. 2186～2196, 2007.

[22] http://www.kstec.co.kr

Appendix

Table 1～4는 수리적 모형을 실행하기 위한 입력 데이터로서 해군 함정에 관한 정보, 각 함정이 필요한 서비스에 대한 중요도, 그리고 각 선석별 제원과 지원 가능 서비스에 관한 입력 자료이다.

Table 1에서 함정의 숫자 앞에 표시된 첫 영문은 함정의 유형을 나타낸다(K : 구축함, F : 호위함, A : 군수 지원함, PM : 미사일을 장착한 초계함 P : 초계함). Table 1에서 P5함은 무장작업과 포 배열 서비스를 필요로 하며, 이를 위해서는 해당선석에서 단일계류, 최 외측 계류해야 한다.

본 연구에서는 함정의 입출항일에 대해서 Table 1의 입력 자료를 근거로 불확실성을 반영한 확률 값을 Table 2와 같이 부여하였다. 이는 시간이 지나면서 함 일정이 변할 수 있다는 불확실성을 반영한 것이다. 1/13번 함정은 입항일에 대해, 5/11번 함정은 출항일에 대해서 확률값을 주었다.

Table 3은 함정 유형/서비스별 중요도를 기반으로 개별 함정별 서비스에 대한 중요도 값을 정한 것이다.

예를 들어, 구축함 K1은 긴급수리와 태세유지를 필요로 하며, 이에 대한 중요도는 각각 94/48이다.

Table 4는 선석의 특성 및 지원 가능한 서비스를 나타낸 것으로, 4/5선석은 유류수급을 지원하는 선석이고, 6/7선석은 긴급 수리 또는 크레인 작업과 같은 서비스를 지원하는 수리선석이다.

Table 1. 함정에 대한 입력자료(SD_{sa})

함정	길이	전원 케이블 수	입항일	출항일	단일 계류 여부	최외측 계류 여부	선석 이동 벌점
K1	130	1	3	5	No	No	7
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	7
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	7
A15	130	1	1	5	No	No	4

Table 2. 함정의 입출항 확률(P_{st})

함정 \ 시간	0	1	2	3	4	5	6	7
K1	0	0	0.3	0.7	1	1	0	0
F2	0	1	1	1	0	0	0	0
F3	0	0	0	0	1	1	0	0
PM 4	0	0	1	1	1	0	0	0
P5	0	1	1	1	1	0.7	0.3	0
P6	1	1	1	1	0	0	0	0
K7	1	1	1	1	1	1	0	0
A8	1	1	1	0	0	0	0	0
P9	1	1	0	0	0	0	0	0
P10	1	1	1	0	0	0	0	0
F11	0	0	1	1	1	0.7	0.3	0
P12	0	1	1	1	1	0	0	0
F13	0	0	0.3	0.7	1	1	0	0
K14	0	0	1	1	1	1	0	0
A15	0	1	1	1	1	1	0	0

Table 3. 함정에 대한 서비스 중요도(LQ_{sq})

구분	긴급 수리	유류 수급	무장 작업	크레인 작 업	태세 유지	수리	포 배열	탄약 적재	부식 작업
K1	94	-	-	-	48	-	-	-	-
F2	-	33	-	-	40	-	-	16	-
F3	-	33	-	-	40	-	-	-	-
PM 4	-	-	-	-	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 4. 선석에 대한 입력자료(PD_{pa})

선석	길이	전원 케이블수	긴급 수리	유류 수급	무장 작업	크레인 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

Fig. 1은 위에서 설명했던 Table 1~4의 입력 데이터를 OPL Studio의 데이터 파일로 변경한 것을 나타낸다.

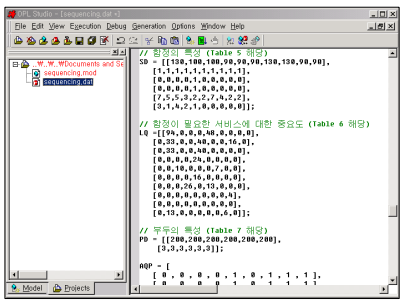

Fig. 1. OPL Studio 입력 파일