

잠수함 지원업무 요구일정과 부두 가용자원을 고려한 선석할당계획

최지원* · † 최인찬

*고려대학교 석사과정생, † 고려대학교 산업경영공학과 교수

Requirements for Berth-Allocation Planning When Taking Pier-Available Resources and Submarine Support Service Request Schedules into Account

† Ji-Won Choi · In-Chan Choi*

† Student, Graduate School of Korea University, Korea

*Professor, Dept of Industrial Management Engineering, Korea University, Korea

요 약 : 본 논문은 현재 한국 해군 잠수함 선석할당방법을 반영하여 기존의 잠수함 선석 할당계획문제를 확장하고 해당문제를 해결하는 정수계획모형을 제안한다. 기존의 잠수함 선석 할당계획 문제는 정박 중 선석 이동과 지원업무 실패를 최소화하면서, 잠수함이 필요한 지원업무가 가능한 선석에 잠수함을 할당하는 것이다. 반면, 한국 해군에서는 선석이동과 지원업무실패 최소화뿐만 아니라 부두 가용자원을 고려하여 잠수함이 요구하는 지원업무의 일정을 최대한 보장하면서, 선석을 할당한다. 따라서 본 논문은 한국 해군의 운용상황에 맞게 기존의 잠수함 선석 할당계획 문제를 확장하고, 부두가용자원의 특징과 잠수함 지원업무 일정의 조율을 포함하는 모형을 제시한다. 제안하는 모형은 선석 이동 횟수, 지원업무 지원 실패 횟수, 잠수함 지원업무 요구 일정 조율 횟수를 최소화하는 것을 목적으로 한다. 본 모형의 검증용 위해서 한국 해군의 상황을 바탕으로 고려한 가상의 데이터로 실험을 수행하여 기존의 잠수함 선석 할당계획 문제와 비교·분석한다.

핵심용어 : 선석할당, 일정계획법, 정수계획법, 군수적제, 해군항만

Abstract : His paper looks more closely at the Republic of Korea's (ROK) Navy submarine berth-allocation strategies, with the study's results ultimately resulting in the proposition of an integer programming model. Current submarine berth-allocation planning problems include the need for more minimal berth-shifting and general support service failures, as a lack of efficient submarine berth-allocation often leads to submarines unable to receive the support service they need due to the inadequacy of their assigned berths. Currently, the ROK Navy allocates berths by only taking available reserve resources and the full-capacity limits of support services into account. This paper expands upon this strategy, and proposes a model which would allow for submarine berth allocation planning to also take submarine support service scheduling into account, allowing for more efficient and timely submarine servicing. This proposed model in turn minimizes berth shifting, support service failures, and allows for full coordination with the submarine support service request schedule. The construction of this model was carried out through data gathered on the ROK Navy's fleets and forces, allowing for a more nuanced analysis of existing issues with submarine berth-allocation planning.

Key words : berth allocation, maritime logistics, integer programming, submarine servicing, navy port maintenance procedures

1. 서 론

한국 해군이 운용하는 잠수함의 크기와 사용하는 추진체계는 점점 발달하고 다양화되고 있다. 한국 해군은 1984년 소형 잠수정인 돌고래 급을 독자 건조해 도입함으로써 본격적인 잠수함을 운용을 시작하였다. 1992년부터 209급 장보고함 인수, 2007년부터는 아시아 최초로 AIP를 갖춘 214급 잠수함을 인수하였다. 최근 3,000톤급 잠수함까지 인수하며 현재의 수중 전력을 갖추고 있다. (Hwang, 2015) 또한 군은 2021~2025년 국방중기계획을 발표하며 3,600톤급 및 4,000톤급 잠수함의 확보 계획을 발표하였다.

잠수함 전력이 다양화되면서 잠수함이 필요한 지원업무 및 지원자원도 다양화되고 있다. 디젤엔진 이용한 추진만 아니라 AIP(Air Independent Propulsion)체계를 추가로 사용하는 214급 잠수함은 수소와 액화 산소를 연료로 사용한다. 이때 수소와 산소는 특정 설비를 이용해야만 잠수함에 적재가 가능하다. 하지만 선석의 크기, 설비의 규모, 예산 등을 고려하였을 때 모든 잠수함에 수소나 액화 산소를 동시에 적재 할 수 있는 분량의 장비를 보유하는 것은 제한적이다. 따라서 필요 시 설치 가능한 만큼의 설비를 갖추거나, 이동형으로 장비를 제작하여 지원업무를 수행한다. 따라서 잠수함 선석 할당계획은 부두의 가용자원에 대한 특징을 상황에 맞게 반영해야 한다.

† Corresponding author : 정회원, ichoi@korea.ac.kr

* 정회원, tjsql011@korea.ac.kr, 02)3290-3773

또한 잠수함 선석 할당계획은 안전사고로 인한 전투력 손실도 고려되어야 한다. 폭발 위험성이 있는 무장적재, 수소적재 등의 지원업무는 유사시 다른 함정에 피해를 최소화 할 수 있는 선석에서 수행한다. 그리고 잠수함 항해 특성상 좁은 항만 안에서 변침, 변속이 어렵기 때문에 충돌사고, 훗줄 터짐 사고 등의 안전사고가 발생할 수 있는 선석 이동은 안전관리 측면에서 지양된다.

잠수함 정박계획에는 전비 태세 유지를 위한 지원업무 일정 외에도 지휘관 교대, 장비정비, 각종 교육/훈련, 승조원 휴가 집행 등의 다양한 업무가 반영되어 있다. 따라서 잠수함 선석 할당계획에서 지원업무 일정을 잠수함이 요구한 대로 최대한 반영하는 것이 일정 관리 측면에서 효율적이다.

위의 사항들을 고려하였을 때 잠수함 선석할당계획은 부두 가용자원의 제약, 안전사고 방지를 위한 선석 구분, 선석이동 최소화, 잠수함의 지원업무 일정반영 등을 포함하여 수립해야 한다.

잠수함 선석 할당문제를 다룬 Brown(1998)은 선석에서 지원업무의 수행 가능 여부를 기준으로 한 잠수함 선석 할당모형을 제시하였다. 잠수함이 요청한 지원업무 일정에 해당 지원업무가 수행 가능한 선석에 할당되면 가점을 받는다. 별점은 요구 일정에 지원업무가 불가능한 선석에 할당되거나 선석 이동 소요가 발생한 경우이다. 가점과 별점의 차가 최대가 되는 선석 할당이 제시한 모형의 최적 선석할당이다. 선석 할당 이후 선석에서 잠수함의 지원업무 수행 가·불을 판단하고 점수화한다.

Brown의 잠수함 선석할당문제에서는 잠수함 간 일정 조율이 고려되지 않고, 지원업무의 제약을 선석에서 지원업무 수행 가능여부로만 판단한다. 따라서, 본 논문에서는 해당 문제를 확장하여 지원자원을 이동형/고정형으로 구분하고, 잠수함 간 지원업무 일정조율을 반영한 모형을 제시한다.

논문의 구성은 1장 서론과 2장 선행연구를 통해 잠수함 선석할당에 관해 설명하고, 이후 3장에서 문제 가정 및 수리모형을 제시한 뒤 4장에서 현실 상황을 바탕으로 가정한 유사 환경의 실험 및 분석을 실시한다. 결과를 토대로 5장에서 결론을 도출한다.

2. 선행연구

항만의 선석 할당계획 문제는 잠수함뿐만 아니라 모든 선박에 중요한 문제 중 하나이다. 선석 할당관련 연구는 군함 선석 할당과 민간항만 선석 할당이 구분되어 연구되었다. 군함의 선석 할당계획 문제는 계획된 정박계획 내에서 필요한 지원업무를 받을 수 있는 선석에 함정을 할당하는 것을 중심으로 연구되었다. 반면 민간항만의 선석 할당은 출·입항 계획을 조정하거나, 선석의 여유 공간에 선박을 정박시키는 등의 부두 가동률을 높이는 것을 중심으로 연구되었다.

먼저, 민간항만 대상 연구는 군함 대상 연구보다 비교적 많

은 사례가 있다. Lai and Shih(1992)은 FCFS (First - Come - First - Out)하에서 선박을 정박 시간과 선박별 예상 지원업무 소요 시간의 합을 기준으로 구분하고 휴리스틱을 통해 선박을 선석에 할당하는 모형을 제안했다. 반면, Imai(1997)는 선박이 도착순서로 입항하지 않고 정박 시간과 정박순서에 대한 불만족도를 최소화하는 다목적 비선형 정수계획모형을 제시하였다. 이후 연구에서 도착시간과 선석의 길이를 동시에 고려한 연구가 진행되었다. Lim(1998)은 선석을 연속적인 공간으로 간주하고 선석 할당계획 문제를 2차 그래프로 표현하였다. 선박을 정박 시간(x축)과 전장(y축)으로 표현하고, 정박 중인 선박들의 전장 총합이 선석의 길이(y축)를 넘지 않고 정박시간(x축)의 합을 최소화하는 휴리스틱 모형을 제시하였다.

선박의 정박 시간을 줄이기 위해 지원자원의 할당 또는 지원자원의 일정 수립에 관련한 연구도 많이 진행되었다. Daganzo(1989)는 선석의 길이가 제한되어 있을 때 위치이동이 자유로운 크레인을 선박에 할당하여 작업 시간을 최소화하면서 모든 선박의 화물 적·하역을 종료하는 동적 계획모형을 제시하였다. 선석과 크레인의 할당을 동시에 고려하는 연구로는 Park et al.(2001)이 제안한 선박의 선적작업을 위한 선석과 크레인의 동시 할당 문제를 다루는 휴리스틱을 이용한 혼합정수모형, Hong et al.(2004)이 제시한 선석과 야드의 상호 관련성을 중심으로 타부 탐색을 이용한 선석 할당모형, Lee et al.(2010)이 제안한 컨테이너 선박의 선석계획과 안벽크레인 할당의 동시 결정을 위한 유전자 알고리즘 기반의 선석 할당 계획모형 등이 있다.

그러나 민간항만을 대상으로 연구한 선석 할당계획 방법을 특수목적용 가진 해군항만에 적용하는 것은 어렵다. 평시 해군 함정은 정해진 출·입항 일정을 준수해야 하고, 필요 업무도 단순 적·하역이 아닌 무장적재, 연료 수급, 장비정비 등 다양한 종류의 지원 작업이 필요하기 때문이다. 따라서 군함의 선석 할당연구는 함정이 요구한 지원업무의 수급 가능 여부를 중심으로 연구되었다.

Thurman et al.(1994)은 함정이 필요한 지원업무의 종류와 정박 일정이 있을 때, 함정의 데이터(출·입항 계획, 필요 육전 규격, 전장, 흘수, 폭, 요구지원 업무 등)와 선석의 데이터(설치 육전 규격, 수심, 길이, 요구지원업무 제공 가능 여부 등)를 고려한 선석 할당모형을 제시하였다. 제시한 모형에서 선석 할당은 함정이 선석에 할당되었을 때 얻는 가점과 선석 이동 시 부여된 별점의 차가 최대값일 때 수립된다. 이때 가점은 해당 선석에서 함정이 요구한 지원업무의 수행 가·불 기준으로 산출된다. 이후 연구에서 Brown et al.(1994)은 선석 이동뿐만 아니라 지원업무 제공 실패에 별점을 추가로 고려한 정수계획모형을 제시하였다.

국내에서 군함을 대상으로 한 연구는 많지 않다. Jung et al.(2004)은 Brown의 연구를 바탕으로 함정의 함형과 지원업무의 우선순위를 고려하여 우선순위가 높은 지원업무를 먼저 제공하는 선석할당 모형을 제시하였다. 이후 연구에서 승인된

선석 할당계획에서 선석이 변경되었을 경우 동일한 수준의 전비 태세를 유지하는 모형(Jung, 2009)과 함정이 계획된 입항일에 입항하지 않을 확률을 고려한 선석 할당문제를 다루었다.(Jung, 2010) 기존의 균형 선석할당과 달리 Won(2009)은 전시 해군함정이 해상에서 교전 중 각 함정이 필요한 지원업무를 받기 위해 모항에 귀항 시 최단 시간 내 전장에 재투입할 수 있도록 부두에 잔류하는 함정의 수를 최소화하는 모형을 제시하였다.

3. 최적화 모형 수립

3.1 문제 정의 및 가정

한국 해군에서 지원업무 일정을 고려한 선석 할당계획수립 시 고려하는 상황은 다음과 같다.

첫 번째, 잠수함의 정박계획에 잠수함이 필요한 지원업무 일정이 포함되어 있다. 잠수함의 정박계획이 1~10일이라고 할 때 잠수함이 필요한 지원업무 일정은 정박기간(1~10일) 안에서 수립된다.

두 번째, 잠수함이 한 시점에 동시에 받을 수 있는 지원업무와 그렇지 않은 지원업무는 구분된다. 무장적재의 경우 잠수함의 특성상 다른 지원업무를 동시에 수행하는 것은 불가능하다. 그러나, 부식적재와 유류 보급과 같이 각 업무가 상호 관련이 적은 업무는 동시에 지원 가능하다.

세 번째, 각 잠수함이 요구하는 지원업무는 지속해서 지원되어야 한다. 지원업무를 받는 동안 다른 선석으로 이동하거나, 지원자원이 타 잠수함을 지원하는 것은 반영하지 않는다.

네 번째, 지원자원이 선석에 종속되지 않고 이동형으로 제작된 경우가 있으며, 선석 특성상 해당 지원업무가 가능한 선석과 불가능한 선석이 구분되어 있다. 이때 선석과 지원자원의 특성을 종합적으로 고려하여 잠수함에 할당한다.

위 문제를 반영하여 본 논문에서는 잠수함의 요구 지원업무 종류와 일정이 있을 때 선석 이동 횟수, 지원 업무실패 횟수, 지원업무 일정 조율 횟수를 최소화한 잠수함 선석 할당모형을 제시한다. 다음의 가정은 본 논문에서 다루는 선석 할당문제를 모형화하기 위한 사항이다.

첫 번째, 잠수함 지원업무를 수행하는 도중 설비가 고장 나거나, 급작스러운 일정변경으로 인한 지원 중단은 없다.

두 번째, 선석 할당계획을 수립하는 대상 기간에 동일 함정의 입·출항이 두 번 이상 계획되어 있어도 출항 후 재입항한 함정은 다른 잠수함으로 간주한다.

세 번째, 잠수함의 정박계획 시 정박 중인 잠수함의 총 척수는 선석의 개수보다 작거나 같다. 선석의 정박 허용범위 이상의 정박계획은 수립되지 않는다.

네 번째, 지원업무 제공 시간은 지원부대가 함정으로 도달하는 시간, 지원업무 수행을 위해 잠수함과 지원부대의 준비시간, 지원업무에 필요한 설비를 작동하고 준비하는 시간 등

을 포함한다.

다섯 번째, 잠수함은 모든 선석에 정박할 수 있고 단독계류한다. 모든 선석에서 잠수함의 홀수, 전장, 폭은 선석의 허용범위보다 작다.

선석과 일정이 여유로운 상황에서는 잠수함이 원하는 지원업무일정을 그대로 수행할 수 있다. 하지만, 잠수함이 필요한 부두 가용자원이 부족하거나, 출·입항이 반복되는 상황에서 고려해야 하는 경우의 수는 많아진다. 선석할당 담당자가 복잡한 일정을 종합하여 모든 잠수함이 만족할만한 선석할당계획을 수립하는 것은 많은 시간이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 아래와 같은 모형을 제시한다.

3.2 수리모형

□ Notation

- s : 잠수함(Submarine)
- b : 선석(Berth)
- q : 지원업무(Required Service)
- t : 단위시간(half day)
- e : 지원업무 세부일정의 변동 가능 범위
- C_{qt} : 지원업무 q 의 자원 수량
- C_q : 지원업무 q 의 부하
- C_b : 선석 b 에서 단위시간에 제공가능한 지원업무의 총 부하
- L_q : 지원업무 q 의 제공시간
- A_{qb} : 지원업무 q 가 선석 b 에서 가능하면 1, 그렇지 않으면 0
- IP_{st} : 잠수함 s 가 t 시점에 정박 예정이면 1, 그렇지 않으면 0
- WS_{sq} : 잠수함 s 가 지원업무 q 를 요구하면 1, 그렇지 않으면 0
- WS_{sqte} : 잠수함 s 의 지원업무 q 를 t 시점에 요구한 일정에서 $\pm e$ 만큼 확장된 일정이면 1, 그렇지 않으면 0

□ Decision variable

- X_{sbt} : 잠수함 s 가 t 시점에 선석 b 에 계류하면 1, 그렇지 않으면 0
- Z_{sbt} : 잠수함 s 가 t 시점에 선석 b 로 이동하면 1, 그렇지 않으면 0
- Y_{sibt} : 잠수함 s 가 t 시점에 선석 b 에서 지원업무 q 를 받으면 1, 그렇지 않으면 0
- F_{sq} : 잠수함 s 가 지원업무 q 를 받지 못하는 경우 L_q , 그렇지 않으면 0
- E_{sqe} : 잠수함 s 가 요청한 지원업무 q 를 $\pm e$ 만큼 확장된 스케줄을 선택하면 1, 그렇지 않으면 0
- S_{sibt} : 잠수함 s 가 요청한 지원업무 q 가 b 선석에서 t 시점에

시작되면 1, 그렇지 않으면 0

- L_{sqbt} : 잠수함 s 가 요청한 지원업무 q 가 b 선석에서 t 시점에 종료되면 1, 그렇지 않으면 0

상기한 notation과 Decision variable을 사용하여 다음과 같이 수리모형을 제시한다.

$$\min P_Z \sum_s \sum_b \sum_t Z_{sbt} + P_F \sum_s \sum_q F_{sq} + P_E \sum_s \sum_q \sum_c |e| E_{sqe} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_b X_{sbt} = IP_{st} \quad \forall s, t \quad (2)$$

$$\sum_s X_{sbt} \leq 1 \quad \forall b, t \quad (3)$$

$$\sum_s \sum_q C_q Y_{sqbt} \leq C_b \quad \forall b, t \quad (4)$$

$$\sum_s \sum_b Y_{sqbt} \leq C_{qt} \quad \forall q, t \quad (5)$$

$$\sum_t E_{sqt} = 1 \quad \forall s, q \quad (6)$$

$$Y_{sqbt} \leq \sum_e WS_{sqte} E_{sqe} X_{sbt} \quad \forall s, q, b, t \quad (7)$$

$$Y_{sqb(t-1)} - Y_{sqbt} \leq L_{sqbt} \quad \forall s, q, b, t \setminus \{0\} \quad (8)$$

$$Y_{sqbt} - Y_{sqb(t-1)} \leq S_{sqbt} \quad \forall s, q, b, t \setminus \{0\} \quad (9)$$

$$L_{sqb(t+L_q)} = S_{sqbt} \quad \forall s, q, b, t \quad (10)$$

$$\sum_t Y_{sqbt} = L_q \sum_t S_{sqbt} \quad \forall s, q, b \quad (11)$$

$$\sum_b \sum_t \sum_c WS_{sqte} E_{sqe} Y_{sqbt} = L_q W_{sq} - F_{sq} \quad \forall s, q \quad (12)$$

$$IP_{s(t-1)} IP_{st} (X_{sb(t-1)} - X_{sbt} + Z_{sb(t-1)}) \geq 0 \quad \forall s, b, t \setminus \{0\} \quad (13)$$

$$X_{sbt} \in \{0, 1\} \quad \forall s, b, t \quad (14)$$

$$Y_{sqbt} \in \{0, 1\} \quad \forall s, q, b, t \quad (15)$$

$$Z_{sbt} \in \{0, 1\} \quad \forall s, b, t \quad (16)$$

$$S_{sqbt} \in \{0, 1\} \quad \forall s, q, b, t \quad (17)$$

$$L_{sqbt} \in \{0, 1\} \quad \forall s, q, b, t \quad (18)$$

$$E_{sqt} \in \{0, 1\} \quad \forall s, q, t \quad (19)$$

$$F_{sbt} \in \square \quad \forall q, b, t \quad (20)$$

(1)번 식은 목적식으로 잠수함이 정박 후 각 잠수함의 선석 이동, 지원업무 실패 횟수 그리고 지원업무 요구 일정의 변경 횟수의 총합을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 이때 P_Z, P_F, P_E 는 각각 선석이동, 지원업무 실패, 지원업무 요구 일정 조율에 대한 가중치로 선석 할당 담당자의 주관에 따라 부여한다.

(2)~(3)번 식은 잠수함 정박에 관련한 제약식이다. (2)번 식은 잠수함 s 가 계획된 시점 t 에 정박하는 정박계획 IP_{st} 를 표현한 식이다. (3)번 식은 시점 t 에서 잠수함 s 는 정박하고

있는 선석 이외에 다른 선석에 정박해있을 수 없다는 물리적인 제약을 표현한다.

(4)~(5)번 식은 지원업무의 부하와 관련된 식이다. (4)번 식은 시점 t 시점에 선석 b 에서 수행할 수 있는 지원업무의 총 부하는 C_b 까지 가능하다는 것을 표현한다. 본 모형에서는 C_b 를 1로 가정한다. (5)번 식은 지원업무 q 의 동시 지원 가능량에 관련한 식이다. 예를 들어, 잠수함 s 와 s' 두 척 모두 지원업무 q 와 q' 를 동일 시점에 요구한다고 할때, 지원업무 부하가 $C_q=0.5, C_{q'}=0.3$ 이라면, t 시점의 지원업무 부하 총합은 0.8이므로 한 시점에 동시에 지원 할 수 있다. 그러나 지원업무 q 의 동시 지원 가능량이 1($C_{qt}=1$)이고 q' 의 동시 지원 가능량이 2($C_{q't}=2$)라면 잠수함 두 척 중 한 척은 지원업무 q 의 지원이 불가하다.

(6)~(7)번 제약식은 잠수함의 지원업무 조율 일정 선택에 관한 제약식이다. (6)번 식은 확장된 일정은 하나만 반영한다는 제약식이다. (7)번 식은 조율한 일정에 잠수함 선석 할당이 완료되었을 때, 지원업무가 집행되는 것을 표현한 제약식이다. 예를 들어 잠수함 지원업무 요구 일정 WS_{sqtl} 가 계획되어 있을 때, $e=1$ 이면 WS_{sqtl} 는 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다.

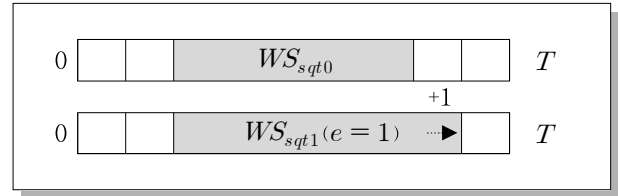


Fig. 1 The support service schedule without expanded(WS_{sqtl0}) and the expanded support service schedule (WS_{sqtl1}) when $e = 1$

(8)~(10)번 제약식은 지원업무의 시작과 종료에 관한 변수 S_{sqbt} 와 L_{sqbt} 를 결정하는 제약식이다. 이때 S_{sqbt} 와 L_{sqbt} 의 간격은 지원업무 q 의 지원시간 L_q 과 같다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 2과 같다.

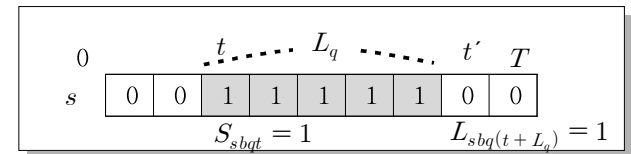


Fig. 2 Duration of support service

(11)번 제약식은 지원업무의 연속성에 관한 제약식이다. 지원업무가 시작되면, 지원업무는 필요시간 L_q 만큼 지속해서 제공되어야 한다.

(12)번 제약식은 변경된 함정 s 가 원하는 지원업무 수급 일정에서 지원업무 제공이 실패할 경우를 나타내는 변수 F_{sq} 의 제약식이다.

(13)번 제약식은 잠수함 s 가 계획된 일자 IP_{st} 에서 선석 이동을 결정하는 변수 Z_{sbt} 를 나타내는 식이다.

(14)~(20)번 식은 의사결정변수의 형태를 표현한다.

3.3 휴리스틱 알고리즘

본 논문에서 제시하는 모형은 이차 정수계획모형이다. 일반적으로 이차 정수계획모형은 큰 사이즈 문제를 해결하는데 적합하지 않다. 따라서 본 모형에서는 문제 크기가 클 때 사용할 수 있는 휴리스틱을 이용한 방법을 제안한다.

step 1) $E_{sq0}=1$ 로 설정하고 본 논문에서 제시한 모형에 대입한다.

step 2) 지원업무 제공 실패횟수 관한 변수 F_{sq} 가 가장 큰 잠수함을 선정한다.

step 3) 해당 잠수함이 지원업무를 실패하지 않을 수 있는 e 를 찾고 e' 로 업데이트 한다.

step 4) $E_{sqe}=1$ 로 고정하고 제시한 모형에 대입하여 해를 찾는다.

step 5) step 2) ~ step 4)의 과정을 반복한다.

step 6) F_{sq} 의 총 합이 0이 될 때 까지 반복하거나 더 이상 F_{sq} 의 값이 줄어들지 않을 때 탐색 종료

4. 실험결과 및 분석

현실문제에 적용가능성을 확인하기 위하여 한국 해군의 지원업무를 바탕으로 지원업무 7종과 잠수함 선석이 5개인 환경을 구성한다. 지원업무의 종류와 특성은 table. 1과 같다. 이때 6, 7번 지원업무는 이동형 장비를 사용하는 것으로 가정한다.

Table 1 The service features with potable support service resource

Section	Berth (b)	Capacity of service (C_{qt})	Required time (L_q)	Service workload (C_q)	Type	
Support service (q)	1	1, 2, 3, 4, 5	5	1	0.3	Fixed
	2	1, 2, 3, 4, 5	5	1	0.3	Fixed
	3	1, 5	2	5	0.7	Fixed
	4	2, 4	2	5	0.7	Fixed
	5	3	1	4	1	Fixed
	6	1, 4, 5	2	2	1	Portable
	7	1, 2, 3, 4, 5	1	1	0.3	Portable

구성된 가상의 잠수함 부두에서 총 14일(28t)동안 10번의 잠수함 정박이 계획되어 있고 각 잠수함이 필요한 지원업무 종류와 일정은 table. 2와 같다고 가정한다. 이때 한 선석에서 지원가능한 지원업무의 부하 총합은 $1(C_b=1)$ 이다.

Table 2 Detail schedule of berthing plans

□ : berthing plan, Number : required support service by submarine

t \ s	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
1	3, 7	3, 3, 3, 3						1					
2				2, 3, 3	7, 3, 3	6, 6							
3		1, 3, 3, 3, 3	3, 3, 3										
4					1, 7, 3, 3, 3, 6, 6								
5					6, 6, 3, 3, 3, 3, 3	1							
6	4, 4, 4, 4, 4	2											
7	6, 6, 5, 5, 5, 5, 4, 4, 4, 4	2, 4											
8							1, 2, 5, 5, 5, 5, 7, 4, 4, 4, 4, 4						
9										1, 2, 4, 4, 4, 4, 4, 7			
10				1, 7	5, 5, 5, 5, 4, 4, 4, 4, 4								

다음 내용은 기존 잠수함 선석할당 문제와 비교하기 위하여 지원업무 일정이 변경되지 않고, 지원자원이 선석에 고정되어 있을 때를 가정한 실험결과(table. 4, 5)와 본 논문에서 제시한 일정이 조율되고 이동형 지원자원이 있는 모형의 실험결과(table. 6, 7) 그리고 본 논문에서 제시한 모형을 휴리스틱으로 도출한 결과(table. 8, 9)를 비교한 것이다. 잠수함 선석할당에서 지원업무 실패, 선석이동, 지원업무 조율에 관한 가중치는 선석이동($P_Z=20$), 지원업무실패($P_F=40$), 일정조율($P_E=1$)로 지정한다. 모든 실험은 Window 10을 OS로 한 AMD Ryzen 5 3600 6-Core processor @ 3.6GHz 성능의 PC를 이용하였고, 최적화 솔루션은 Gurobi 9.03을 이용한다.

4.1 기존 잠수함 선석할당문제와의 비교

기존 잠수함 선석할당 문제에선 가용자원이 선석에 할당되어 있고, 함정의 일정이 조율되지 않는다. 이와 같은 환경을 조성하기 위해 지원업무의 종류와 특성을 table. 3과 같이 구성한다. 지원업무 6번은 선석 4, 5번에 고정으로, 지원업무 7번은 선석 1번으로 고정되어 있는 것으로 임의 가정한다. 실험 시 일정조율의 가중치는 없다.

Table 3 The service features without potable support resource

Section	Berth (b)	Capacity of service (C_{qt})	Required time (L_q)	Service workload (C_q)	Type	
Support service (q)	1	1, 2, 3, 4, 5	5	1	0.3	Fixed
	2	1, 2, 3, 4, 5	5	1	0.3	Fixed
	3	1, 5	2	5	0.7	Fixed
	4	2, 4	2	5	0.7	Fixed
	5	3	1	4	1	Fixed
	6	4, 5	2	2	1	Fixed
	7	1	1	1	0.3	Fixed

먼저 기존의 잠수함 선석할당문제의 잠수함 선석 할당 결과는 table. 4와 같다. 계산시간은 0.14초로 매우 짧은 시간에 결과가 산출되지만, 선석이동 12회, 지원업무 제공 실패 3회 (F_{27}, F_{53}, F_{107})로 산출된다. 지원업무의 실패여부를 포함한 상세일정은 table. 5와 같다. 지원업무를 실패한 경우 한 잠수함이 요구한 지원업무 일정이 다른 잠수함의 일정과 중복되어 지원자원을 사용하지 못하거나, 필요한 지원자원이 있는 선석에 잠수함이 할당되지 않은 것으로 해석된다.

Table 4 The result of berth allocation without potable resource and coordinating schedule

■ : Berthing plan, Number : Allocated berth

t \ s	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
1		1				2							
2					5		1			3			
3		5											
4						1				5			
5	3				4								
6		2		3									
7	4		3		2								
8								3		1		2	
9											4		1
10						3		2					

Table 5 Detail schedule of berthing plans with fail support service

Number : Support service, ■ : Berthing plan, ■ : Service Failures

t \ s	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
1	3, 7	3, 3, 3, 3								1			
2					2, 3, 3, 3, 7	3, 3, 6, 6							
3		1, 3, 3, 3, 3, 3											
4						1, 7, 3, 3, 3, 6, 6							
5					6, 6, 3, 3, 3, 3, 3				1				
6	4, 4, 4, 4, 4		2										
7	6, 6, 5, 5, 5, 5, 4, 4, 4, 4				2, 4								
8							1, 5, 5, 5, 5, 7, 4, 4, 4, 4, 4						
9											1, 2	4, 4, 4, 4, 4, 7	
10					1, 7	5, 5, 5, 5, 4, 4, 4, 4, 4							

반면 본 논문에서 제시한 잠수함 선석할당문제의 잠수함 선석할당 결과는 table. 6과 같다. 계산시간은 2,935초로 기존의 문제를 계산하는 것 보다 많은 시간이 소요되지만, 선석이동 7회, 지원업무 제공 실패 0회, 지원업무 조율 3회($E_{439}, E_{75(-2)}, E_{764}$)가 산출된다. 기존 잠수함 선석할당문제 대비 선석이동 횟수는 15회에서 7회로 총 8회 감소하고 지원업무 실패

횟수는 3회에서 0회로 총 3회 감소하여 선석이동, 지원업무 실패 모두 줄어드는 결과를 보인다. 조율된 지원업무 상세일정은 table. 7과 같다. 기존의 잠수함 지원업무 일정을 조율하여 선석이동이 최소화 하면서 지원업무 실패가 없는 일정으로 변경된다.

Table 6 The result of berth allocation with potable resource and coordinating schedule

■ : Berthing plan, Number : Allocated berth

t \ s	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
1		1				2							
2										1			
3		5											
4								4				5	
5	4		3					5					
6		2											
7	3			4									
8									3			4	
9												2	
10							3		2				

Table 7 Coordinated detail schedule of berthing plans with fail support service

Number : Support service, ■ : Berthing plan, ■ : Coordinated Service

t \ s	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
1	3, 7	3, 3, 3, 3								1			
2					2, 3, 3, 3, 7	3, 3, 6, 6							
3		1, 3, 3, 3, 3, 3											
4						1, 7		6, 6			3, 3, 3, 3, 3		
5							6, 6, 3, 3, 3, 3, 3			1			
6	4, 4, 4, 4, 4		2										
7	5, 5, 5, 5, 6, 6	4, 4, 4, 4	2, 4										
8								1, 2	5, 5, 5, 5, 7	4, 4, 4, 4, 4			
9											1, 2	4, 4, 4, 4, 4, 7	
10					1, 7	5, 5, 5, 5, 4, 4, 4, 4, 4							

4.2 휴리스틱을 이용한 방법과의 비교

본 논문에서 제시한 모형을 휴리스틱으로 산출한 선석할당 결과와 조율된 일정은 table. 8, 9와 같다. 휴리스틱을 이용한 모형 계산 결과는 table. 10과 같다. 본 논문에서 제시한 모형의 실행결과와 비교할 때 지원업무 실패는 0회로 동일하다. 그러나, 선석이동은 9회로 제시한 모형보다 2회 많고, 목적값은 최적값과 17.6%가 차이가 있다. 반면 계산시간은 2,935초에서 약 1초로 매우 개선된다.

Table 8 The heuristic result of berth allocation with potable resource and coordinating schedule

		Berthing plan												Number : Allocated berth		
t \ s		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26		
1		5			3			2								
2										1						
3		1														
4											5					
5		3	4		5				4							
6			2													
7		4	3		4											
8										3			2			
9													4			
10							3			2						

Table 9 Detail schedule of berthing plans

Number : Support service, Berthing plan, Coordinated Service

t \ s	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26					
1	3, 7	3	3	3	3					1								
2					2, 3	3, 3	7, 3	3, 6	6									
3		1	3	3	3	3												
4						1, 7	3, 3	3, 3	6, 6									
5				3	3	3	3	3	6	6	1							
6	4	4	4	4	4	2												
7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	2, 4								
8									1, 2	5	5	5	5	7	4	4	4	4
9											1, 2	4	4	4	4	4	7	
10					1, 7	5	5	5	5	4	4	4	4	4				

Table 10 The heuristic results of each step

step	Obj.v	Coordinated schedule	Opt.gap	Compute time	Failure support service
0	340	-	54.7%	0.24 sec	Submarine 5's 3rd, 6th support service
1	265	Submarine 5's 3rd support service adjusted by -5t	41.8%	0.19 sec	Submarine 5's 6th support service
2	187	Submarine 5's 6th support service adjusted by +2t	17.6%	0.20 sec	-

4.3 지원자원 수량 변경 시 선석 할당결과

Fig. 3은 필요시간이 길고 선석의 제한이 있는 지원업무 3, 4, 5, 6번의 지원자원 수량을 변경하여 산출한 선석 할당결과이다. 표에서 y축은 산출결과(선석이동, 일정업무 조율, 지원업무 실패)의 횟수를 나타내고, x축은 지원자원의 변경량을 나타낸다. 모든 실험결과에서 지원업무 실패는 산출되지 않았다. 지원자원이 많아질수록 선석이동 횟수는 줄어드는 경향이

있다. 하지만 일정조율 횟수는 선석이동과 같은 경향을 나타내지는 않는다.

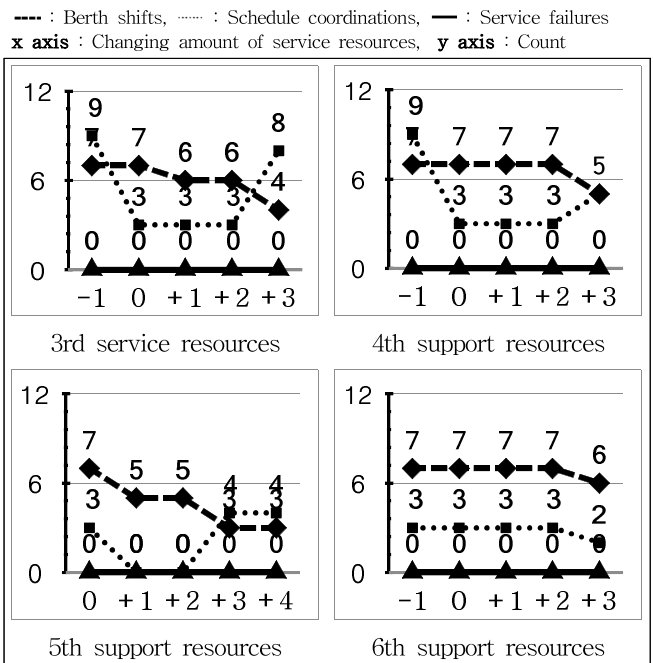


Fig. 3 The results of changing amount of service resources

3, 4번 지원업무는 변경량이 -1개, +3개 일 때, 일정 조율 횟수가 기존 결과보다 더 많다. 5번 지원업무의 경우 +1,+2개 일 때 일정 조율 횟수가 0으로 감소되지만, +3개 이상 일 때 일정조율 횟수가 4회로 증가된다. 이는 3, 4, 5번 지원업무의 지원시간이 다른 지원업무에 비하여 길고, 해당 지원업무를 요구하는 잠수함이 많기 때문으로 판단된다.

지원자원의 수량이 적을 때, 일정 분산 후 잠수함이 이동하는 것이 목적값 최소화에 더 유리한 반면, 자원이 수량이 많을 때 일정조율 통해 할당된 선석에서 지원업무를 더 일찍 받거나, 늦게 받는 것이 선석이동을 최소화하는데 유리하기 때문으로 판단된다. 따라서 3, 4, 5번 지원업무 같은 형태의 일정을 최소로 변경하는 일정을 위해선 선석이동, 일정조율, 지원업무 실패에 대한 가중치 조절이 필요한 것으로 판단된다.

6번 지원업무의 경우 지원자원의 수량변화와 선석이동 및 지원업무 조율 간 상호 연관성이 작다. 이는 해당 지원업무가 이동형이기 때문에 필요한 잠수함이 정박한 선석에서 지원업무가 수행되기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

잠수함의 선석 할당계획에서 부두의 가용자원과 잠수함들의 함 일정을 모두 고려한 선석 할당계획은 많은 경우의 수가 존재한다. 매번 모든 경우를 확인하여 선석 할당계획을 수립하는 것은 많은 시간이 소요된다. 따라서 적절한 모형을 활용하는 것이 계획수립 시간 절감 측면에서 효율적이다.

본 논문에서 다루는 잠수함 선석 할당계획 문제는 부두 가용자원과 지원업무 시간을 고려하면서, 지원 업무 실패, 선석 이동, 지원 업무 일정 변경을 최소화하는 데 있다. 해당 문제를 모형화하고 기존의 잠수함 선석 할당계획 문제와 비교를 위해 가상의 데이터로 실험한 결과를 비교분석 하였다. 이를 통해 동일 상황을 해결할 때 보다 적합하게 현재 한국 해군 상황에 적용할 수 있음을 보인다.

나아가 빅사이즈 문제를 해결할 때 계산 시간을 줄일 수 있도록 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 또한 지원자원의 수량변화에 따라 선석이동과 일정조율 횟수 산출결과를 비교하고, 이를 통해 지원업무의 특징에 따른 자원의 수량, 가중치의 적절성 등을 판단하였다.

제시한 모형은 지원자원을 고정형과 이동형으로 구분하고 지원업무의 연속성이 반영된다. 또한 잠수함의 정박계획에서 지원업무의 실패와 선석 이동 횟수를 최소화하고 필요시 지원업무 일정이 조율한다. 전문가의 의견이 중요한 군의 업무 특성상 모형에 전문가 의견이 반영될 수 있도록 선석 이동, 지원업무실패, 일정 조율에 관한 가중치를 변경할 수 있도록 일반적인 모형으로 제시하였다.

선석할당은 민간항만을 대상으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 특수목적을 가진 군항만의 선석할당에 관한 연구가 미비한 만큼, 본 논문이 군 항만의 특수성을 설명하였다는데 의의가 있다. 본 연구는 평소 모든 지원업무가 이상없이 지원되는 경우를 가정하였기에 그 한계가 있다. 따라서 실무에서 더욱 유용하게 쓰일 수 있기 위해서는 지원업무의 실패 등 확률적인 부분이 반영하는 것을 향후 연구과제로 남겨두기로 한다.

References

- [1] Brown, G. G., Cormican, K. J., Lawphongpanich, S. and Widdis, B. D.(1998), "optimizing submarine berthing with a persistence incentive", Naval Research Logistics volume 44, Issue. 4, pp. 301-318.
- [2] Brown, G. G., Lawphongpanich, S. and Thurman, K. P.(1994), "Optimizing ship berthing" Naval Research Logistics, volume 41, Issue 1, pp. 1-15.
- [3] Daganzo, C. F.(1989), "The crane scheduling problem" Transportation Research Part B : Methodological Vol. 23, Issue. 3, pp. 159-175.
- [4] Hong, D. H. and Kim, C. G.(2004), "Optimized Module Design for Berth Planning of Logistics Information System Using Tabu Search Algorithm" Korea Information Processing Society B vol. 11-B, Issue. 1, pp. 63-70.
- [5] Hwang, J. Y.(2015), "Korean Navy Underwater Power Enhancement and Export Strategy", Degense & Technology, pp. 58-75.
- [6] Imai, A., Nagaiwa, K. and Tat, C. W.(1997), "Efficient Planning of Berth Allocation for Container Terminals in Asia" Journal of Advanced Transportation, Vol. 31, Issue. I, pp. 75-94.
- [7] Jeong, D. H., Park, Y. M., Lee, B. G., Ryu, G. R. and Kim, G. H.(2006), "A Quay Crane Scheduling Method Considering Congestions in the Yard of Container Terminals", The Korean Operations Research and Management Science Society Conference, pp. 1178-1185.
- [8] Jung, W. S., Kim, J. H. and Kim, S. K.(2004), "A study on Berth Allocation for Navy Surface Vessels Considering Precedence Relationship among Service", Journal of Korean Navigation and Port Research. vol. 28, Issue. 1, pp. 83-90.
- [9] Jung, W. S. and Lee, J. Y.(2009) "The Berth Allocation Method for the Navy Surface Vessels Considering Persistence Incentive" The Korean Operations Research and Management Science Society Academic conference, 2009.10, pp. 286-297.
- [10] Jung, W. S., Lee, J. Y. and Lee, Y. D.(2010), "The Berth Allocation Method for the Navy Surface Vessels Considering Uncertainty", Korea Institute of Military Service and Technology, Vol. 13, Issue. 5, pp. 748-758.
- [11] Lim, A.(1998), "The berth planning problem" Operations Research Letters Volume 22, Issues 2 - 3, pp. 105-110.
- [12] Lai, K. K. and Shih, K.(1992), "A Study of Container Berth Allocation," Journal of Advanced Transportation 26 (1), pp. 45-60.
- [13] Lee, W. B. and Koo, P. H.(2010), "Simultaneous Determination of Berth Schedule and Quay Crane Allocation", Journal of the Korean Society of Supply Chain Management, Vol. 10, Issue. 2, pp. 51-62.
- [14] Ministry of Defense Press Release, 2020. 8. 9. <https://www.mnd.go.kr>.
- [15] Park, Y. M. and Kim, K. H.(2011), "A Heuristic Algorithm for Berth Planning with a Limited Number of Cranes", Journal of Navigation and Port Research Vol. 35, Issue. 1. pp. 63-70.
- [16] Thurman, K. P.(1989) "Optimal ship berthing plans", Naval Postgraduate Thesis and Dissertation Collection.
- [17] Won, H. S., Ho, A. T. and Lee, S. H.(2009), "A Berth Allocation Problem to Maximize the Available Rate of Naval Vessels", The Korea Society for Simulation, vol 18. Issue. 2. pp. 19-27.

Received 09 November 2020

Revised 27 November 2020

Accepted 03 December 2020