

El Farol Bar 모형을 활용한 효율적인 해군 함정정비를 위한 건선거 운용 방안 분석

차선교¹ · 윤봉규^{2*}

¹대한민국 해군, ²국방대학교 군사운영분석과

Efficient Drydock Operations Strategies for Naval Fleet Maintenance Using El Farol Bar Model

Sunkyo Cha¹ · Bongkyoo Yoon²

¹Republic of Korea Navy

²Department of Operations Research, Korea National Defense University

Regular maintenance of the submerged hull section is crucial for vessels, especially naval ships, as it directly impacts their combat capability. However, the current naval fleet faces challenges in establishing efficient maintenance plans due to a shortage of Drydocks, unpredictable changes in ships schedules, and the diverse maintenance procedures required for different types of ships. Previous works on this topic have limitations in analyzing dynamic decision-making situations caused by the aforementioned complexities. Meanwhile, Arthur (1994) developed an agent-based model to predict customer numbers at a restaurant near a research laboratory (El Farol), which bears similarity to the naval fleet maintenance problem where competing agents make strategic decisions based on limited resources. This study aims to apply the El Farol Bar model to naval Drydock operations, with the objective of exploring effective strategies to avoid exceeding naval ship's maintenance cycles and minimize overall waiting time for maintenance.

Keywords: Agent Based Modeling, Drydock, Dry docking, Naval Fleet, Maintenance, Repair, El Farol Bar, Strategies

1. 서론

현재 우리나라는 북한을 비롯한 주변국 위협의 존재와 더불어 안정적인 해양 자원 확보와 바다에서의 원활하고 안전한 물류 호송에 대한 요구 등으로 인해 해군의 중요성이 나날이 증대되고 있다(Han, 2022). 해군 함정에 대한 작전 임무 요구 증가에 비례하여 함정 전력 또한 지속적으로 증강될 것으로 예상된다. 이에 따라 함정 전력의 원활한 운영과 함정 가동률(Available rate) 유지를 위해 함정 정비의 중요성은 더욱 강조되고 있는 추세이다. 특히 수면하 부분의 선저외판 검사와 추진계통류 검사 및 교정은 함정의 전투능력과 승조원 안전에

직결되는 만큼 중요하다. 함정 수면하 정비를 위해서는 <Figure 1>과 같은 건선거(Drydock)에 입거하여 선체를 상가대에 올려놓고 수리를 하게 되는데 이를 상가정비(Dry docking)라 한다.

현재 해군에서 보유 중인 대형 건선거는 총 3선석으로 해군 정비장에서 운영 중에 있으나, 함정의 대형화와 증가되는 함정 척수로 인해 대형함에 대한 상가정비가 제때 이루어지지 못하고 있다. 더불어 해군에서 운용하는 건선거는 해경의 함정까지 상가정비를 위탁받아 정비하는 관계로 건선거 운영 시 어려움이 더욱 증가하고 있다.

이는 상가정비의 적시성과 더불어 정비·운용비용 측면에

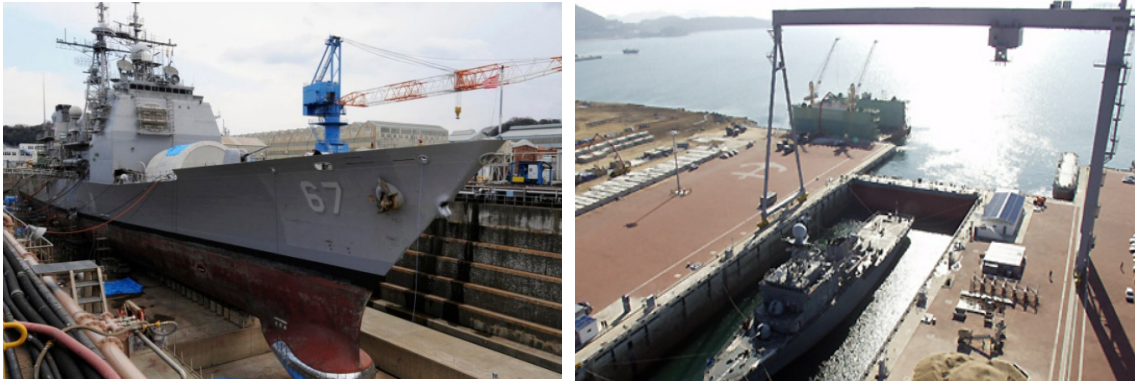


Figure 1. Naval ship in Drydock

서도 문제가 발생하는데, 美 회계감사원 보고서에 따르면 ‘정비가 늦어진 탓에 제때 관리하지 못한 함정의 상태가 더 나빠졌고 이에 따라 다시 정비·운영비용이 증가하는 악순환이 일어나고 있다.’고 분석하였다(GAO, 2023).

위 문제들의 해결방안으로 민간 외주 상가정비를 통해 건설거 부족 현상을 해결하는 방법을 고려해볼 수 있다. 하지만 민간 외주정비의 경우 군사 보안상의 문제와 해군 특성상 유동적인 함 행동으로 인해 계획수립에 제약이 발생하는 점, 정비 인원의 전투함 관련된 수리 경험이 부족하다는 점 등으로 민간 위탁 수리는 어려움이 있다. 또한 건설거 선척을 증축하는 방법은 건설거의 높은 유지비용과 환경성의 문제 등으로 인해 사실상 추가 건설이 어려운 실정이다(Korea Development Institute, 2011).

한편, Arthur(1994)는 El Farol Bar의 고객 수를 예측하기 위해 에이전트 기반 모델을 개발했다. El Farol Bar 모델은 한정된 자원에 대해 주어진 정보를 가지고 각각의 사람들이 어떤 선택을 하고 행위를 하며 자원 획득을 위해 결정해 나가는지를 살펴본 연구다. 본 연구에서는 건설거를 증축하지 않은 상태에서 Arthur의 El Farol Bar 모델을 상가정비를 위한 건설거 모형에 적용하여 효율적으로 건설거를 운용하는 방안 대해 연구하고자 한다.

건설거의 운용과 관련된 연구로 Cho(1983)는 함정의 함대 규모가 커짐에 따른 건설거의 적정규모를 산출하는 연구를 GASP-IV 언어를 이용하여 분석하였으며, 건설거 선척을 추가하며 그에 따른 함정들의 상가대기시간, 건설거 가용도를 확인하였다. 하지만 변화된 정비운용 지침과 긴급상가함정의 변수를 고려하지 않는 등 현 상황에 적용하기는 다소 어려운 부분이 존재한다. OK et al.(2014)은 M/M/c 대기행렬 모형과 ARENA 시뮬레이션을 활용하여, 대형 건설거의 추가 건설 필요성을 주장하였다. 이 연구는 각 건설거별 수용능력(대형·중형)을 구분하여 시뮬레이션한 분석결과로 의의를 가지나, 계획상가와 긴급 상가의 수요를 구분하지 않아 긴급상가함정 우선처리 문제 등 실제 환경을 충실히 반영하지 못했다. 마지막으로 Cho and Yoon(2019)은 우선순위 대기행렬을 통해 건설거의 증축이 없는 상황 하에 건설거를 운영할 수 있는 정책적

인 방안을 제시하였다. 하지만 해당 모형에서 긴급 상가정비의 비율이 실현 가능한 정비 정책을 무효화 시킬만큼 과도한 영향을 미치는 이유로, 불가피하게 긴급 상가정비를 배제한 상태에서 정책적 분석결과를 제시하는 한계가 있다.

2. 함정 상가정비와 El Farol Bar 모형

2.1 El Farol Bar 문제와 함정 상가정비 체계

본 연구는 함정이 작전임무 수행 중 계획된 상가정비 기간이 도래하면 정비창에 입창하여 대기한 후 건설거 입거하여 상가정비를 마치고 다시 작전해역으로 복귀하는 상가정비 체계 일련의 상황들에 대해 El Farol Bar 모형을 활용하여 분석하였다. 함정의 상가정비 또한 한정된 건설거(자원)를 확보함으로써 본인이 속한 함정의 상가정비를 정비주기에 맞추어 수리하는 것이 게임이론과 같다고 볼 수 있기 때문이다.

Arthur의 El Farol Bar 문제와 본 연구에서의 함정 상가정비 체계 간에는 공통적인 부분이 있다. El Farol Bar에서의 개별 인원은 각각의 함정, 방문 목적지인 Bar는 정비창, Bar의 좌석수는 정비창의 함정 수용가능량으로 모형화 가능하다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 El Farol Bar 문제해결에서 활용된 전략(Strategies)을 해군의 상가정비 체계에 접목하였다. 특히 총 함정수, 긴급 상가함정 발생률, 정비창 내 상가수리 대기중인 함정수의 변화에 따른 각 함정의 상가정비 대기시간, 건설거 가동률, 함정들의 상가정비 초과일수 변화에 미치는 영향 등을 분석하고자 한다.

다만, 본 연구는 기존 El Farol Bar 문제보다 복잡한 상황이 존재한다. 첫째, 계획된 상가계획 외 함정 선체의 파공이나 장비 고장으로 인한 긴급상가를 적용해야 한다. 둘째, 기존 El Farol Bar 문제에서는 식당에 한번도 방문하지 않는 그룹이 발생하나 본 연구에서는 정비주기를 고려해서 일정기간 내에는 상가정비를 필수적으로 해야 한다. 셋째, 정비창에서 상가정비를 위해 무기한으로 대기할 수 없기 때문에 함의 지휘관(함장 또는 기관장)의 인내심(Tolerance) 허용치를 넘어가면 정비

장에서 다시 작전해역으로 복귀하여 임무를 수행한다. 실제 상가정비를 위해 정비창에 입창하여 대기하는 도중 타 함정의 긴급상가로 인해 상가정비를 하지 못하고 다시 작전해역으로 돌아가는 경우가 다수 존재한다. 이처럼 본 연구에서 다룬 El Farol Bar 모델을 적용한 건설거의 운용은 기존의 El Farol Bar 문제보다 본질적으로 더 복잡하며, 목표로 하는 해를 찾기가 어렵다.

2.2 El Farol Bar 문제 특성 적용

El Farol Bar 문제와 본 연구에서 행위자들의 특성은 게임 이론을 기반으로 하고 있다. 다시말해 비협조적(Non-cooperative)환경에서 부족한 자원을 놓고 경쟁하는 행위자가 자신의 가설을 세우고 환경에 적응하는 시스템이다(Kang, 2017).

각 함정의 지휘관은 출석 정보(History)를 활용하여 최고의 전략을 수립한다. 지휘관은 다음 주 상가정비를 위해 타 함정들의 정비창 입창 수를 예측하여 본인의 함정이 정비창에 입창할지, 상가를 보류하고 임무해역에서 작전 수행할 것인지 결정한다. 각 함정은 이같은 결정을 위해 과거 정비창 운영 현황(Memory Size)과 지휘관의 전략 수(Number Strategies)를 변수로 받아서 전략(Strategies)을 만든다. 정비창 운영 현황은 과거 어느 정도의 기간만큼 정비창에 입창한 정보를 사용할지를 결정하는 단위이다. 각 함정은 최고의 전략을 찾기 위해 출석 정보와 전략 목록을 활용하고 각 전략이 얼마나 잘 수행되었는지 평가하여 가장 좋은 점수를 가진 전략을 현재 최고의 전략으로 사용한다.

이를 구체적으로 살펴보면, 특정 시점 t에 정비창에 입창한 함정수를 A_t 라고 하자. 정비 주기가 도래한 함정에는 일정 기간동안의 정비창 운용 현황이 제공된다. 특정 시점 t에 제공되는 정보를 H_t 라고 했을 때 본 연구의 건설거 모형은 $H_t \rightarrow A_t \rightarrow H_{t+1}$ 이 반복하면서 진행된다.

El Farol Bar 문제의 모형에 대한 자세한 설명은 Yoon and Jung(2023)의 내용을 참고하기 바란다.

3. 해군 상가정비체계 및 건설거 모형

3.1 함정의 분류 및 상가정비 체계

일반적으로 해군 함정은 만재배수량과 형태에 따라 소형함 · 중형함 · 대형함으로 구분된다(Regulations on Navy Ship Classification and Naming, 2020). 한편, 본 연구에서는 대형함을 기준으로 모형을 설계하였는데, 이는 현재 건설거 부족현상이 대형함에서 가장 두드러지게 나타나는 관례로 대형함 대상의 모형설계가 우선적으로 필요하다고 판단하였기 때문이다. 추가적으로 해경의 대형함정 또한 해군 정비창에서 위탁 수리중에 있기 때문에 모형 설계시 해경 대형함정 수 또한 추가하였다. 해군 및 해경이 보유한 대형함은 <Table 1>과 같다.

참고사항으로 해군 대형함정의 총 전력 수를 종합한 자료는 군사 보안의 이유로 00적으로 표기하였다.

Table 1. Inventory of Large ships in the Navy and Coast Guard

Classification	Standard	Number of ships		
		Navy	Coast Guard	Total
Large ship	Over 3000tons	00	00	00

해군 함정은 상가정비와 관련하여 Republic of Korea Navy Regulation(2018)을 따르고 있으며, 함정들의 상가정비 주기와 정비기간은 <Table 2>와 같다.

Table 2. Dry docking Cycle & Period

Classification	Cycle	Period
Regular Dry docking	6years	30days
Intermediate Dry docking	3years	13days
Emergency Dry docking	occurrence of events (as needed)	6days

상가정비는 계획상가인 정기상가와 중간상가, 비 계획상가인 긴급상가로 구분된다. 계획 상가정비는 정비창에서 정기수리(OVHL, Overhaul)나 임시수리(RA, Restricted Availability)와 같은 수리기간 중간에 사전 계획된 일정에 맞추어 건설거에 입거하여 상가정비를 한다. 해당 정비 공정은 정비창에 상가정비를 위해 먼저 입창하였어도 상가 우선순위가 높은 함정이 먼저 건설거에 입거할 수 있다. 즉, 정비창 입창순서대로 건설거에 입거하는 FIFO(First In First Out)를 따르지는 않으며, 상가정비의 필요성이 더 높은 함정이 먼저 상가정비를 한다.

긴급상가는 함정이 작전해역에서 임무수행 중 고장 · 손상 등으로 긴급하게 상가정비가 필요할 때 수행하는 비 계획적인 상가정비를 말한다. 긴급상가는 선체 수면하 격설의 파공이나 추진축의 고장이 발생하는 등 긴급한 복구를 요구하기 때문에 입거 간 최우선순위를 가진다. 다만, 긴급상가함정 또한 건설거에서 상가정비중이던 함정의 수리 공정을 모두 마친 후 입거한다.

3.2 상가정비 체계 모형 구현

본 연구의 건설거 모형은 각각의 함정에 대한 속성 부여 및 시뮬레이션 분석이 가능한 Netlogo(ver 6.0.4) 프로그램을 활용하였으며, 모형의 구성은 <Figure 2>와 같다. Netlogo 화면의 가운데 부분이 상가정비체계를 모사한 부분이며 파란색 구역(Patch)은 작전해역(Operation sea & Noticing), 노란색은 정비창(Repair Area), 갈색은 대형 건설거(Drydock)로 구분하였다.

상가정비 체계를 Netlogo 시뮬레이션으로 구현하는 것은 대형 함정을 에이전트로 생성하고, 생성시 우선순위, 계획 상가정비 주기를 생성하는 초기 설정 절차인 'setup'과 상가함정들이 상가정비체계에 따라 이동하는 'go' 절차로 나뉜다. 이를 반영한 두 절차에 대해 의사코드(Pseudo Code)와 흐름도(Flow Chart)로 표현하였으며 아래 <Figure 3>, <Figure 4>와 같다.

<Figure 3>의 'setup'에서는 시뮬레이션에 필요한 patch 생성과 함정들의 기본적인 속성을 부여한다. 'go' 절차에서는 긴급상가함정이 정비장에 입창하는 과정과 계획상가정비 함정이 El Farol Bar 모형의 전략을 활용하여 입창하는 과정을 간략하

게 보여주고 있다. 긴급상가함정은 0행에서와 같이 $P = 1/38$ 을 가지는 Bernoulli 시행에 따라 발생하며, 발생 즉시 정비장으로 입창한다. 긴급상가함정 발생률은 과거 실제 데이터를 참고하여 계산한 Cho and Yoon(2019)의 연구를 참고하였으며, 긴급상가 건설거 도착간격은 평균 38일을 가지는 기하분포로 가정하여 $\frac{1}{p} = \frac{1}{38} = 0.026$ 으로 설정하였다.

계획상가정비 함정의 정비장 입창 과정을 나타낸 1행은 El Farol Bar 전략실행을 위한 전략목록(Strategies)을 생성하는 단계로 아래의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

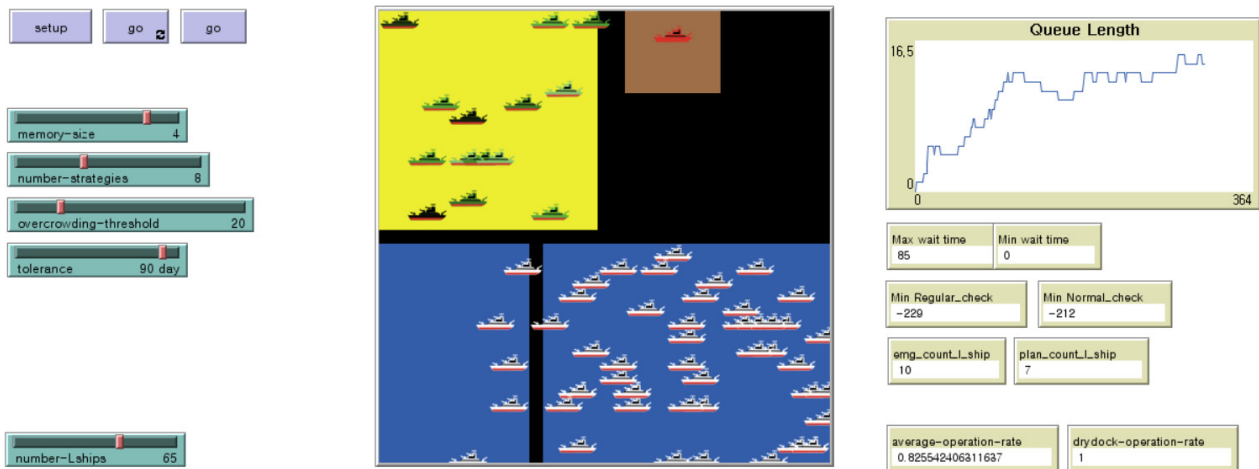


Figure 2. Drydock Model Using NetLogo

```

setup()
0 create patches and ship agents
1 initiate priority with Drydock maintenance cycle and period as agent properties
2 initiate  $History_x$  with random values ; Generate and Initialize  $History_x$  (Number of Ships Waiting at Repair Area) with Random Values

go():loop
# Movement of Emergency Dry docking ships to Repair Area
0 occurs from ships to emergency following ship Random-Bernoulli( $1/38$ ) = 1
  then move ship to Repair Area directly
# Movement of Planned Dry docking ships with the El Farol Bar model to Repair Area
1 make strategies ; Creation of Strategy List
2 make prediction ; Prediction of the Number of Ships Waiting at Repair Area
3 choosing best strategies
4 if prediction < Threshold then
5 move ship to Repair Area
6 else
7 stay noticing patch and update strategies
8 for each ship in Repair Area
9 if empty at Drydock
10 move to Drydock in order of priority
11 tick

```

Figure 3. Dry docking Simulation Pseudo Code

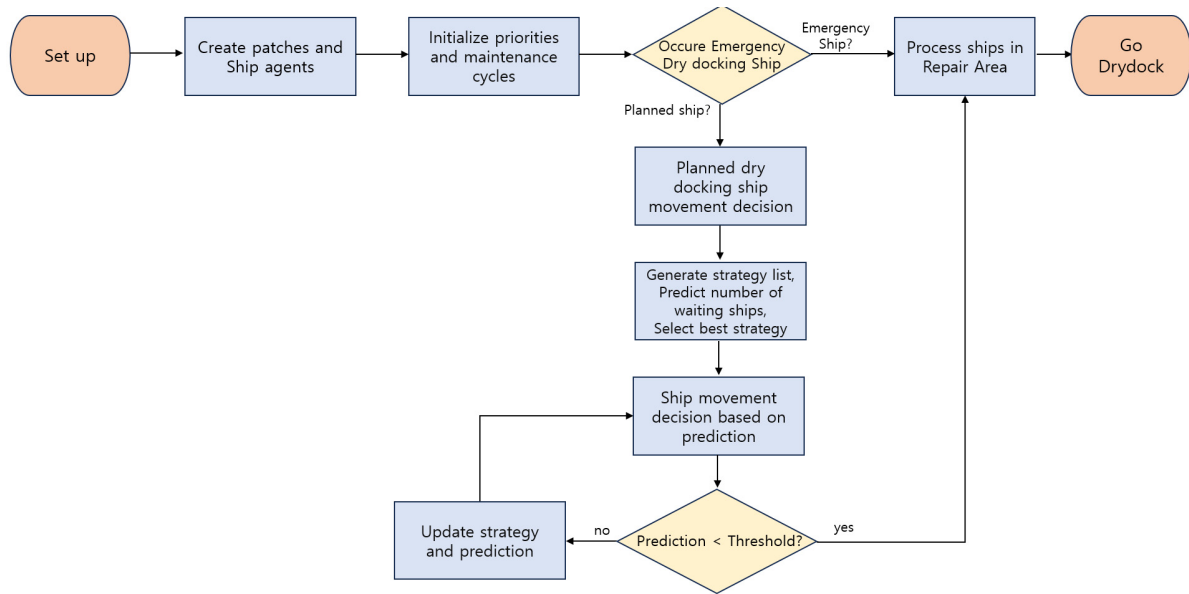


Figure 4. Dry docking Simulation Flow Chart

$$\text{Strategies} = [W_1, W_2, \dots, W_m, C]$$

W_1, W_2, \dots, W_m : 가중치 (1)

C : 임의 상수

$$-1 < W_1, W_2, \dots, W_m, C < 1$$

2행에서는 전략목록을 활용하여 정비창 대기 함정 수를 예상하는 예측값(Prediction)을 생성하는 단계로 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\text{Prediction} = \text{History}_x * W_1 + \text{History}_{x-1} * W_2 \dots + \text{History}_{x-(m-1)} * W_m + C * N \quad (2)$$

N : 함정수

Prediction은 정비창 함정 대기수 정보(History)와 가중치 곱의 합계에 임의 상수(C)와 함정수(N)의 곱의 값을 더한다. 3행에서는 앞서 생산된 전략 목록 중 최고의 전략(Best strategy)을 선택하며 과정은 아래 식 (3)과 같다.

$$\text{Best strategy} = \text{Min}(\text{Prediction} + \text{Error}) \quad (3)$$

최고의 전략은 예측값(Prediction)과 오차(Error)의 합이 가장 작은 것으로 나타낼 수 있다. Error는 실제 정비창 대기 함정수 예측값과의 차이로 $| \text{History}_x - \text{prediction}_x | + | \text{History}_{x-1} - \text{prediction}_{x-1} |$ 와 같이 계산된다. 최고의 전략을 활용한 예측값이 Threshold(정비창의 함정 수용량)보다 낮다면 정비창으로 입창하고, 그렇지 않다면 작전해역에서 머무르며 작전을 수행하고 전략을 업데이트 한다.

정리하면 전략목록(Strategies)의 수는 함정들이 행동을 결정하는 가설의 수이다. 전략의 변경은 각 함정에서 예측한 함정 대기수와 실제 함정 대기수 정보(Histroy)의 차이가 클 경우 해당 전략을 새로운 전략으로 교체하는 방법이다. 예를들어 정비창

함정 대기수 정보(History)가 [30 20 10], 전략목록(Strategies)이 [-0.1 0.6 0.1 0.5]라고 가정하였을 때 예측값(Prediction)은 $30 \times -0.1 + 20 \times 0.6 + 10 \times 0.1 + 0.5 \times 100 = 60$ 이 된다. 다수의 전략목록을 활용하여 위와 같이 생성된 예측값 중 실제 대기 함정수와의 오차값이 가장 적은 예측값을 활용한다. 만약 위 예시의 전략목록이었던 [-0.1 0.6 0.1 0.5]가 최고의 전략이었고, Threshold가 65였으면 해당 함정은 성공적으로 정비창에 입창하게 된다.

이처럼 간단한 El Farol Bar의 전략을 적용함으로써 상가정비를 위해 정비창에 입창하기 전 다른 함정의 행동을 예측하며 각각의 함정들이 최선의 선택을 하도록 설계하였다.

상가 정비체계 Netlogo 모형 구현시 사용된 입력변수 값은 <Table 3>과 같다.

정기 · 중간상가 주기는 각각 3년, 6년을 일(day)로 변환하여 입력하였으며, 모형의 초기값은 상가 주기범위 내에서 랜덤하도록 설정하였다.

Duncan(2008)에 의하면 El Farol Bar에서 사용된 전략의 특성상 시뮬레이션이 장기간 지속되면 학습을 통해 행위자는 두 개의 그룹으로 나누어지게 된다. 본 연구의 모형에서 또한 상가정비 기간이 도래하면 정비창에 정상적으로 가는 함정과 정비기간이 초과되었음에도 작전해역에 계속 남아있는 두 종류의 그룹으로 나뉘게 된다. 하지만 앞서 2.1절에서 언급하였듯이 함정 같은 경우에는 장비가 고장나기 전 예방정비 차원에서 필수적으로 상가정비를 진행해야 한다.

현재 상가정비를 받지 않은 상태에서 함정 운영 가능 기간에 대한 데이터는 별도로 존재하지 않는다. 그러한 이유로 Cho(2020)의 연구에서 제시한 ‘일반적인 함정에서의 장비고장 간격’ 결과를 활용하였으며, 계획상가정비 주기가 339일 초과하는 동안 정비창에 입창하지 않은 함정에 대해 강제적으로

Table 3. NetLogo Model Input Parameter Values

Input parameter	Value	Remarks
Number of ships	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65	-
Large Drydock	1	-
Overcrowding-Threshold of Repair Area	10, 20, 30, 40, 50, 60	available capacity of Dry docking
Dry docking cycle	2190, 1095	Regular/Intermediate Dry docking cycle(day)
Dry docking period	27, 20, 18	Regular/Intermediate/Emergency Dry docking period(day)
Tolerance	90	Maximum waiting period for Dry docking
Memory Size	1, 2, 3, 4, 5	Data storage Period for the number of ships waiting at Repair Area for Dry docking
Occur emergengy Drydocking ships rate	0.026	-

정비창에 입창하도록 모형을 구현하였다. 또한 해당 함정은 긴급상가함정 다음으로 상가정비를 할 수 있도록 하였다.

3.3 성능척도(Performance Measure)

본 건설거 운용 모형의 효율성을 확인하는데 필요한 성능척도는 Cho and Yoon(2019, 43.p)과 Ok *et al.*(2014, 429.p)을 참고하였으며, (1) 평균 정비창 내 대기함정수, (2) 건설거 가동률, (3) 평균 상가정비 주기 초과 일수, (4) 계획/긴급정비 비율이다.

(1) 평균 정비창 내 대기함정수

t 시점에 정비창 내에 대기중인 함정의 수를 n(t)라고 하면 정비창 내 대기하고 있는 함정의 평균 수(L_q)는 식 (4)와 같다.

$$L_q = \frac{\sum_{t=1}^T n(t)}{T} \tag{4}$$

(2) 건설거 가동률

함정이 상가정비를 진행중인 건설거의 가동률(ρ)은 식 (5)와 같다. 건설거 가동률이 1인 경우는 3선석의 건설거가 모두 가동중인 상태이며, 가동률이 0일 경우에는 모든 건설거가 유휴 상태(Idle State)임을 말한다.

$$\rho = \frac{\sum_{t=1}^T I(t)}{T} \quad I(t) = \begin{cases} 1 & t \text{ 시점에서 건설거 가동 중} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

(3) 평균 상가정비 주기 초과 일수

k번째 함정의 상가 주기 초과 일수를 d_k 라 하였을 때, 각 함정들이 상가정비를 진행하지 못하고 주기를 초과한 일수에 대한 평균(E)은 식 (6)과 같다.

$$E = \frac{\sum_{k=1}^N d_k}{N} \quad N = \text{전체 함정 수}, d_k > 0 \tag{6}$$

(4) 계획정비/긴급정비 비율

건설거에서 상가정비를 진행한 함정들의 계획정비(정기상가, 중간상가)와 긴급정비(긴급상가)의 비율(R)은 식 (7)와 같다.

$$R = \frac{\sum_{t=1}^T Plan(t)}{\sum_{t=1}^T Emg(t)} \tag{7}$$

$Plan(t)$: t 시점까지 건설거에서 수리한 계획상가 함정수
 $Emg(t)$: t 시점까지 건설거에서 수리한 긴급상가 함정수

3.4 타당성 검증

본 상가정비 Netlgo 모형의 타당성 검증을 위해 본 모형의 분석결과와 과거 정비실적 및 선행연구에서 사용된 우선순위 대기행렬 분석 모형을 비교하였다. Cho and Yoon(2019)은 실제 상가정비로 인한 정비창 내의 대기함정 정보는 데이터가 없어 확인이 불가능하지만 긴급정비와 계획정비의 비율로 모델의 타당성을 판단하였다. 본 모형의 타당성 검증 또한 긴급정비와 기획정비의 비율을 활용하였으며, 시뮬레이션간 정확

Table 4. Comparative Analysis Results of NetLogo Models

Classification	Past Drydocking Performance	Priority Queue Model (Cho and Yoon, 2019)	Netlogo Model
Number of Large ships		26	
Average Number of ships Waiting	-	24	21.2
Planned Drydocking Ratio	0.435	0.358	0.4382
Emergency Drydocking Ratio	0.564	0.641	0.5618

한 비교를 위해 과거 정비실적 및 우선순위 대기행렬 모형과 동일하게 대형함정 수를 26척으로 조정하였다. 또한 시뮬레이션 종료 시점을 함정의 평균 수명인 30년(10950ticks)으로 설정하였으며 10회 반복한 결과값의 평균을 활용하였다. 과거 정비실적 및 우선순위 대기행렬 모형과 비교분석 결과는 아래 <Table 4>와 같다. 결과를 보았을 때, Netlogo 모형에서 보여지는 계획/긴급정비의 비율이 과거 정비실적과 비교하였을 때 비율이 더욱 흡사하였다.

4. 모형 결과 분석

4.1 기본모형과 전략모형 비교

본 절에서는 상가정비를 위해 정비창에서 대기하는 함정의 수, 건선거 가동률, 상가주기 초과 일수를 기준으로 기본모형과 전략모형을 비교분석 하였다. 분석을 위해 3절에서 설계한 Netlogo 모형을 바탕으로 El Farol Bar 전략을 적용하지 않은 건선거 모형을 일반모형(Normal model), El Farol Bar 전략을 적용한 건선거 모형을 전략모형(Stratgy model)이라고 정의하자.

(1) 평균 정비창 내 대기함정 수

일반모형과 전략모형의 평균 정비창 내 대기함정수의 비교를 위해 함정의 수를 10척에서 실제 대형 함정수인 65척까지 증가시키며 시뮬레이션을 반복하였고 결과는 <Figure 5>의 그래프와 같다.

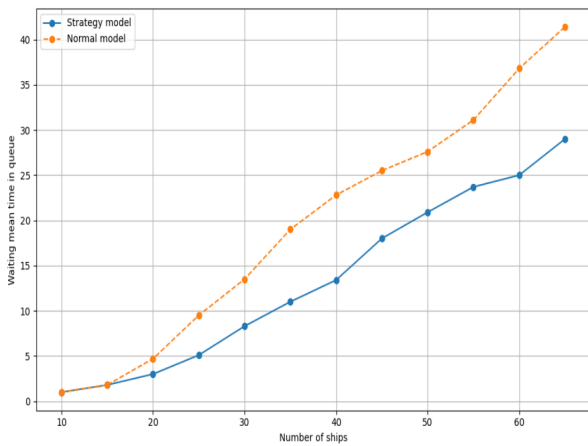


Figure 5. Average Number of ships Waiting in Repair Area for Dry Docking

과란 실선으로 표시된 그래프는 전략모형, 주황색 점선으로 표시된 그래프는 일반모형의 정비창 내 평균 대기함정이다. 그래프를 보면 알 수 있듯이 전략모형이 일반모형보다 정비창 내 평균 대기함정의 수가 전체적으로 낮은 것을 알 수 있다. 특히 모형 내 총 함정 척수를 65척으로 가정하였을 때 전략함정의 평균 대기함정수는 29척, 일반함정은 41.4척으로 약 11척의

큰 차이를 보였다. 이는 전략모형에서의 함정 지휘관이 계획 상가정비 주기가 도래했을 때 무조건적으로 정비창에 입창하는 것이 아닌 정비창 출석정보를 활용하여 상가정비를 위해 대기중인 함정의 척수를 예상하고 전략적으로 상가계획을 반영할 때 운영 효율성이 높아진다고 판단할 수 있다.

(2) 평균 상가정비 주기 초과 일수

평균 상가정비 주기 초과일수는 함정들이 계획된 상가정비 주기를 준수하는지에 대한 중요한 척도다. <Figure 6>은 시간 경과에 따른 일반모형과 전략모형의 정비주기 초과 평균 일수 나타낸 그래프다. 일반모형과 전략모형 모두 계획된 정비주기를 초과하였는데 이는 부족한 건선거를 보유한 현 상황에서는 불가피한 현상으로 판단된다. 하지만 일반모형에서는 평균 428일 상가정비 일자리를 초과한 것에 비해 전략모형의 경우 일반모형보다 103일 적은 325일 초과함을 보였다. 이를 통해 El Farol Bar 문제의 전략을 사용한 전략모형이 계획된 상가정비 주기에 더 근접하여 정비할 수 있음을 보여준다.

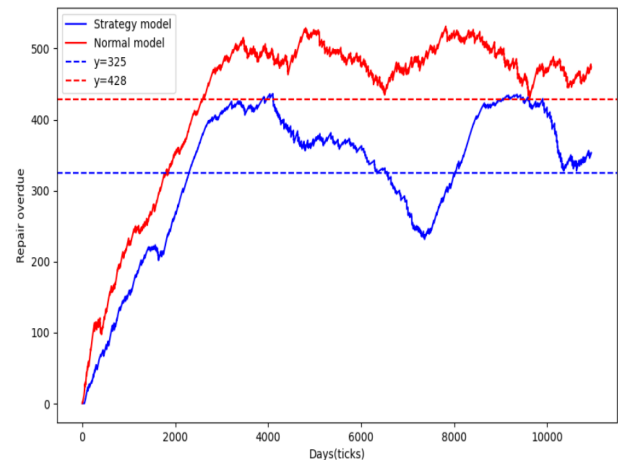


Figure 6. Average Number of Days Exceeding Dry docking Cycle

(3) 건선거 가동률

건선거 가동률 확인을 위해 동일하게 모형 내 총 함정의 척수를 10척에서 65척까지 증가시키며 시뮬레이션을 진행하였으며, 결과는 <Figure 7>과 같다.

분석결과 전략모형과 일반모형이 유사한 그래프 형태를 보였다. 30척부터 건선거의 가동률이 점차 낮아지고 20척부터는 급격하게 낮아지는 것을 확인하였다. 이를 통해 건선거 가동률 및 유지보수를 위한 휴지기간(Maintenance Break)을 고려하여 현재의 정비환경에서는 20~25척의 함정에 대해서 처리하는 것이 적정 수준으로 판단된다.

추가적으로, 본 모형에서는 건선거 가동률 분석 시 함정 수가 30척 이상일 경우 건선거 가동률(p)이 0.99 이상으로 지속되었다. 이는 선행연구에서 분석한 건선거 가동률과 유사하다. Cho and Yoon(2019)에서는 우선순위 대기행렬 모형을 통

한 분석 간 함정 척수가 25척 초과 시 건설거 가동률이 0.99로 흡수되며 추가적인 연구에 어려움이 있었다. 그래서 건설거 가동률을 낮추기 위해 함정 척수를 제한하고, 긴급 상가정비를 제외한 상태에서 연구를 제한적으로 진행하였다. 하지만 본 연구에서는 건설거 가동률이 0.99로 지속되어도 건설거 입거를 위해 각 함정 간 의사결정을 통해 지속적으로 시뮬레이션이 진행되므로 현실적으로 함정수와 긴급상가 발생률을 반영하여 분석할 수 있고 평균 정비창 내 대기함정수, 평균 상가 정비 주기 초과 일수 등 유의미한 연구 결과를 도출할 수 있다.

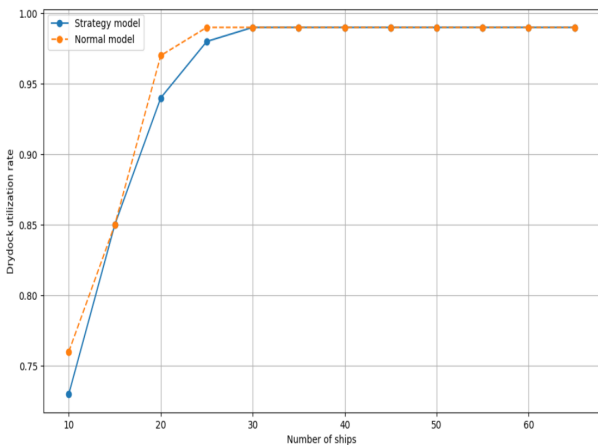


Figure 7. Drydock Utilization Rate

4.2 전략모형 분석

4.1절에서는 정비창 내 대기 함정수와 계획 상가정비 주기 초과일수를 고려하였을 때 El Farol Bar 전략을 적용한 전략모형이 건설거를 운영함에 있어 더욱 효율적임을 확인하였다. 해당 절에서는 전략모형에서의 Overcrowding - Threshold(이하 Threshold)와 Memory Size를 조정하며 우수한 성능을 가지는 전략모형을 확인하였다.

(1) Threshold(정비창 수용 가능량) 조정

정비창에서 함정을 최대 수용할 수 있는 경계를 나타내는 Threshold의 조정이 정비창 내 대기 함정의 수에 미치는 영향을 확인하고자 한다. 함정의 수는 65척으로 설정하였으며, Threshold를 10부터 60까지 증가시키며 실험을 진행하였으며, Threshold의 변화에 따른 정비창 내 대기중인 함정의 수와 함정 가동률의 비교를 위해 <Figure 8>과 같이 정규화를 하여 그래프로 표현하였다.

파란색 실선은 평균 정비창 내 대기중인 함정의 수이며, 주황색 실선은 함정 가동률이다. 함정 가동률은 $1 - \frac{\text{수리대기 시간} + \text{상가정비 시간}}{\text{총 시간}}$ 이다.

Threshold의 증가에 따라 정비창 내 함정의 대기 수는 증가하였으며, 이로 인해 작전해역에서 활동하는 함정 수가 줄어들면서 함정 가동률이 낮아지는 것을 확인하였다.

들면서 함정 가동률이 낮아지는 것을 확인하였다.

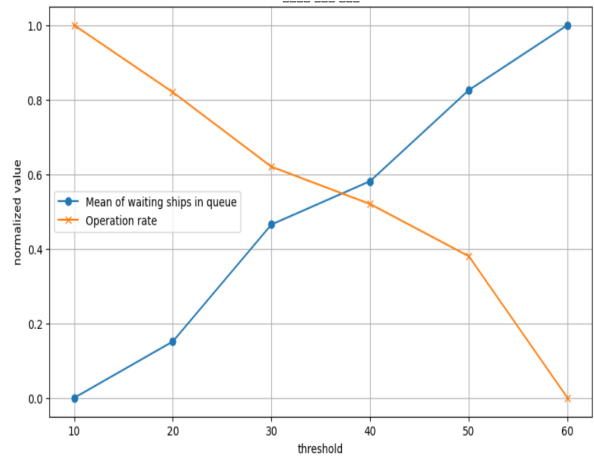


Figure 8. Average Number of Waiting Ships and Ships Operational Rate(Normalized) According to Changes in Threshold

위 결과를 보았을 때 상가계획 담당자는 정비창 내 대기 함정 허용 수준에 관련된 정보를 각 함정에 제공 시 가능한 보수적으로 공개하는 것이 좋을 것으로 판단되나, 이는 각 함정이 정비창에 입창하는 것을 꺼리게 만듦으로써 상가정비 주기를 과도하게 초과하는 함정이 발생할 가능성이 높아질 수 있음을 고려해야 한다. 추가적으로 Threshold의 변화는 건설거 가동률에 영향을 미치지 않았다.

(2) Memory Size(정보 공개 기간) 조정

Memory Size를 1에서 5까지 조정하며 평균 정비창 내 대기 함정수를 확인한 결과는 <Figure 9>와 같다.

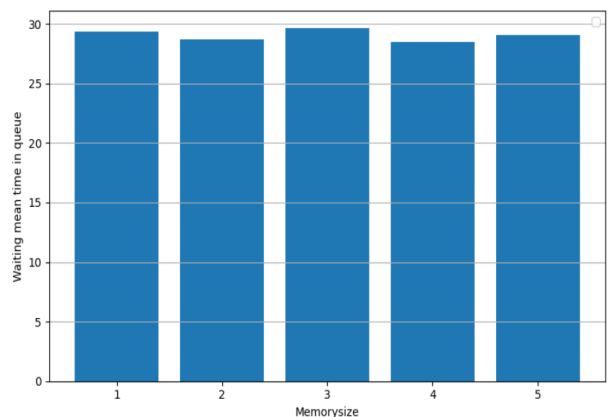


Figure 9. Average Number of Waiting Ships According to Changes in Memory Size (1 to 5)

Memory Size를 1부터 5까지 조정하며 시뮬레이션을 진행한 결과 정비창 내 대기 함정 수가 모두 평균 29척 수준으로 변동이 없는 수준이다. 한편, Memory Size의 변화(1, 5)에 따른 함정 대기수의 변동 폭(Fluctuation)의 차이를 확인하였으며 결과

는 <Figure 10>과 같다.

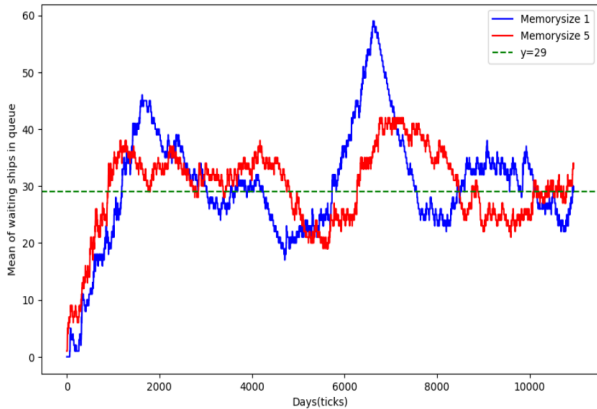


Figure 10. Fluctuation in Average Number of Waiting Ships for Memory Size(1, 5)

평균 대기 함정수(29척)를 기준으로 Memory Size가 5인 모형(적색 실선)이 Memory Size가 1인 모형(청색 실선)에 비해 전반적으로 변동 폭이 안정적인 것을 시각적으로 확인하였다. 정비창 내 대기 함정 수에 대한 변동 폭의 안정성은 수리부두 현황 관리 및 상가 일정 관리에 더욱 유리할 것이다.

5. 결론

본 연구에서 우리는 Netlogo 프로그램을 활용해 El Farol Bar 모형의 전략을 적용한 효율적인 해군 건설거 운용 방안에 대해 분석하였으며 다음과 같은 사항을 확인하였다.

첫째, 건설거 가동률이 99%로 흡수된 상태에서 시뮬레이션이 진행되어도 각 함정의 의사결정에 따른 변화를 분석함으로써 평균 상가정비 대기시간이나 평균 정비 초과 일수 등 의미 있는 결과 도출이 가능함을 보였다. 이는 긴급 상가율의 반영이나, 실제 함정 척수의 반영을 가능하게 함으로써 모형의 현실 설명력을 높였다.

둘째, 건설거의 추가적인 확보가 제한적인 상황에서 El Farol Bar 문제의 간단한 전략을 적용한 전략 모형이 상가정비를 위한 평균 함정 대기 수와 정비 주기 초과 일수 감소에 효과가 있음을 보였다.

셋째, El Farol Bar 전략을 적용한 전략 모형을 활용함에 있어 Threshold와 Memory Size를 조절하며 더욱 효율적인 모형을 찾았다. Threshold의 증가는 작전중인 함정이 상가정비를 위해 정비창에 입창할 수 있는 기회를 높이기도 하지만 이와 반비례하여 함정 가동률은 낮아질 수 있음을 보였다. Memory Size의 변화는 평균 정비창 내 대기함정 수의 변동폭에 영향을 미치며, Memory Size가 클수록 평균에서 변동폭이 적은 안정적인 모형의 형태를 띠었다.

종합적으로 본 연구는 다음과 같은 시사점을 제공한다. 상가정

비 계획을 정비창 상가계획 담당자가 통제하는 것이 아닌 과거 몇 주간(Memory Size)의 상가 현황과 정비창의 함정 수용량(Threshold)을 전 함정에 공유하여 함정의 지휘관이 직접 일정을 조율하도록 한다. 다만, 긴급 수리 함정이 발생하거나, 과도하게 상가 주기를 초과한 함정에 대해서만 상가계획 담당이 정비 우선 순위로 배정한다면 정비창에서 대기하는 함정의 수 및 각 함정들의 상가정비 주기 초과 일수 감소가 기대된다. 또한 정비창 상가 계획담당 업무의 가중이 낮아지는 방안이 될 것이다.

추가로 본 연구에서 분석한 현상은 대부분 시간 평균(Time Average)을 통해 도출되었다. 에르고드 성질(Ergodicity)을 만족시키는 마코프 체인은 시간 평균과 앙상블평균이 일치한다. 본 연구에서 도출한 결과는 마코프 체인 모형과 시뮬레이션 모형 두 접근법 모두 분석 가능하다. 결과적으로 다양한 현실을 반영하기 용이한 시뮬레이션 모형을 주로 사용했지만, 충분히 오랜시간 시뮬레이션을 한다면 시간 평균과 앙상블 평균이 일치할 것으로 판단되며, 이러한 판단하에 시간 평균 결과를 주로 활용했다. 에르고드 성질과 시간 평균과 앙상블 평균의 관계는 Ross(2014)를 참고하길 바란다.

향후 본 연구의 Netlogo 모형을 바탕으로 건설거 수를 현재 해군이 운용중인 3선석으로 확장함으로써 소형·중형함의 상가 정비체계도 구현할 수 있다. 또한 본 연구에서 제시된 모형을 활용하여 다양한 정책적 변화에 대해 일선 지휘관의 반응을 고려한 효과를 예측할 수 있어 현실 적합성 높은 정비정책 수립의 개연성이 높아질 것으로 기대된다.

참고문헌

- Arthur, W. (1994), Inductive reasoning and bounded rationality, *The American Economic Review*, 406e411.
- Cho, D. U. (1983), A Simulation Study of Navy Drydocks, *Journal of the Military Operations Research Society of Korea*, 9(2), 23-30.
- Cho, S. H., Yoon, B. K. (2019), An Analysis on the Operation Level of the Dry Dock for Warship Maintenance Using Priority Queue, *Korean Management Science Review*, 36(1), 37-49.
- Cho, W. Y. (2020), A Study on the Distribution of Naval Ship Failure Time Considering Planned Maintenance, Korea National Defence University.
- Duncan, W. (2008), The El Farol Bar Problem Revisited : Reinforcement Learning in a Potential Game, *Edinburgh School of Economics Discussion Paper Series*, 186(2).
- GAO(Government Accountability Office). (2023), Weapon System Sustainment: Navy Ship Usage Has Decreased as Challenges and Costs Have Increased, GAO.
- Han, J. H. (2022), A Study on the Changes of Security Environment and the Roles of the ROKN, *The Journal of Strategic Studies*, 29(1), 233-261.
- Kang, G. H. (2017), The El Farol Problem Revisited: Rational adjustment to apply to social problems, Hanyang University
- Korea Development Institute. (2011), 2011 Preliminary Feasibility Study Report on the Construction of a Dry Dock for Warships. Korea Development Institute.

- Ok, K. C., Cho, S. J., Jeon, J. H., Yang, J. Y., & Cho, Y. C. (2014), A Study on an Efficient Size Dry Docks for Warship Maintenance using Queueing Problem, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 40(4), 428-434.
- Republic of Korea Navy. (2018), Navy Regulation No. 2351, Ship Maintenance Regulations & Naval Maintenance Yard Precedent No. 648, Commercial Maintenance Support Regulations, Republic of Korea Navy.
- Republic of Korea Navy. (2020), Navy Regulation No. 2450, Regulations on Navy Ship Classification and Naming, Republic of Korea Navy.
- Ross, S. M. (2014), Introduction to Probability Models, Elsevier 11th ed., Los Angeles, California.
- Wilensky, U., Rand, W. (2015), *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo*, MIT Press.
- Yoon, B. K., Jung, J. W. (2023), Exploring the Possibilities of Applying the El Farol Model in the Field of Logistics, *Korean Logistics Society Spring Conference*.

저자소개

차선교 : 목포해양대학교 조선해양공학과에서 2012년 학사, 2024년 국방대학교에서 군사운영분석과 석사학위를 취득하였다. 현재는 대한민국 해군 대구함(FFG-818) 부장으로 재직하고 있으며, 연구분야는 데이터마이닝, Agent Based Modeling이다.

윤봉규 : 연세대학교 경영학과에서 1996년 학사, 1998년 한국과학기술원 산업공학 석사, 2002년 산업공학 박사학위를 취득하였다. 현재 국방대학교 운영분석전공 교수로 재직하고 있으며, 연구분야는 Agent Based Modeling/Complexity Theory, Stochastic Models in Military O.R, Biz.Performance Optimization & Innovation이다.