

고장확률 기반 계획정비 대기행렬 시뮬레이션: 해군 전투함정을 중심으로

박정서¹ · 문성암² · 최진우^{2*}

¹대한민국 해군, ²국방대학교 국방관리학과

Planned Maintenance Queue Simulation based on Failure Probability: Focused on the Naval Battleship

Jeongseo Park¹ · Seongam Moon² · Jinwoo Choi²

¹Republic of Korea Navy

²Department of Defense Management, Korea National Defense University Department of Defense Management,
Korea National Defense University

The constant maintenance interval performed by ROK Navy ships has the advantage of convenient maintenance planning. In the past study, the failure rate of the ship continued to change with the life of the ship. Planned maintenance performed at regular intervals may not be appropriate to maintain the varying amount of failure of ships. Probability-based maintenance considers the changing amount of ship failure. Although the effect of probability-based maintenance was derived from previous studies, it was studied based on a single ship. Therefore, in this study, the effect of applying probability-based maintenance to multiple ships was confirmed as in reality. When maintenance was performed according to probability, the maintenance time overlapped and queuing occurred. The system dynamics simulation was performed considering the advantages of applying probability-based maintenance and the disadvantages due to queuing at the same time.

Keywords: Constant Maintenance Interval, Failure Rate, Probability Based, Queueing, Simulation

1. 서론

해군은 함정의 추진용 엔진을 운용함에 있어 인도부터 퇴역까지 주기적으로 계획정비를 수행 중이다. 엔진 제작사는 매뉴얼을 통해 고장간 평균시간인 MTBF(Mean Time Between Failure)를 기준으로 정비할 것을 권고한다. 해군은 이러한 제작사 매뉴얼에 기초하여 20주 운용 후 6주 계획정비를 실시한다(ROKN Regulation, 2018). 한편 함정정비는 계획정비와 고장정비로 구분된다. 계획정비는 고장이 발생하지 않아도 실시하는 예방차원의 정비이다. 고장정비는 계획정비 사이에서 고장이 발생하여 긴급하게 수행되는 정비이다.

기존 연구에서 고장의 발생량은 <Figure 1>과 같이 총수명

주기 동안 욕조모양(Bathtub shape)의 추세로 발생한다고 알려져 있다. 장비 도입 초기에는 구성품의 변동 발생, 잘못된 조립, 제조 과정의 실수 등으로 고장이 상대적으로 많이 발생한다. 초기의 고장확률 추세가 점차 낮아지면서 장비는 안정화 기간에 접어든다. 장비가 노후화되면서, 다시 고장확률이 증가한다(Lee, 2019). 군은 제작사 매뉴얼에 의거 계획정비 간격을 상수(MTBF)로 고정하여 취급한다. 총수명주기 동안 고장량이 욕조모양을 띤다면 계획정비 간격 역시 이에 맞게 설정되어야 한다.

Choi *et al.*(2020)은 해군과 같이 일정한 간격으로 수행하는 정비방법을 기간고정형 계획정비라고 명명하였다. 기간고정형 계획정비를 수행하면, 정비예산이나 장비운용 등 계획수립

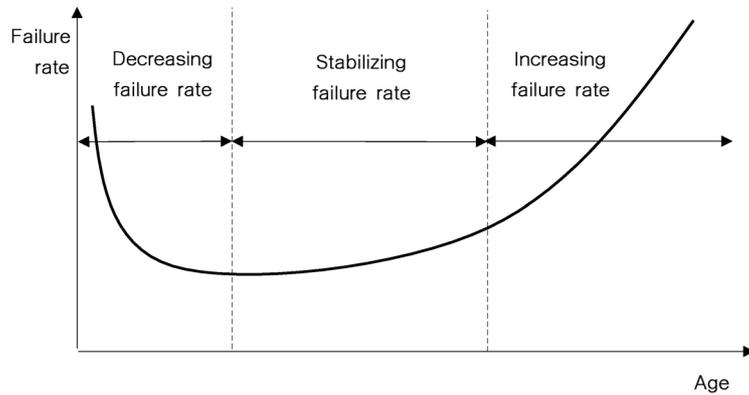


Figure 1. Bathtub Shape Failure Rate

Table 1. Strengths and Weaknesses by Planned Maintenance Performance Criterion

Maintenance	Performance criterion	Strengths and Weaknesses
Period fixed maintenance	MTBF (constant time frequency)	<ul style="list-style-type: none"> • Inappropriate maintenance time • Difficulty in optimizing maintenance manpower • Easy to establish maintenance plan (budget, ship and shipyard operating etc.)
Probability based maintenance	Failure rate (failure function)	<ul style="list-style-type: none"> • Reliable equipment operation • Easy to optimize maintenance manpower • Difficulty in establishing a maintenance plan (budget, ship and shipyard operating etc.)

측면에서 편리하다는 장점이 있다. 하지만 육조모양처럼 고장 발생량이 많은 수명 초기와 말기에는 고장확률이 높음에도 불구하고, 정비주기가 도래하지 않았다는 이유로 적절한 정비시기를 놓칠 수 있다. 또한 <Figure 1>과 같이 고장의 발생량이 변한다면 계획정비 시 수행해야할 정비량이 매번 변한다. 매번 수행하는 정비량이 다르기 때문에 정비인력 편성이 어렵다. Choi et al.(2020)은 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방법으로 확률기반형 계획정비를 제시하였다.

확률기반형 계획정비란 고장확률의 변화에 따라 정비간격을 조절하는 방법이다(Choi et al., 2020; Choi et al., 2021). 매번 정비간격이 다르기 때문에 정비계획 수립이 어렵다. 즉, 정비예산이나 장비 운용에 높은 유연성을 요구한다. 하지만 장비

운용중에 누적되는 고장량이 상대적으로 적어 안정적인 장비 운용이 가능하며, 정비량의 편차가 적어져 정비인력 운용에 유리하다. <Table 1>는 기간고정형 계획정비와 대비하여 Choi et al.(2020)의 확률기반형 계획정비의 수행기준과 장·단점을 정리한 것이다. <Figure 2>는 확률기반형 계획정비와 기간고정형 계획정비의 정비 수행시점과 정비량을 비교한 것이다 (Choi et al., 2021). x축은 함정의 총수명 31년을 개월 단위로 표현한 것이다. y축은 정비량을 의미한다. 적색은 확률기반형 계획정비의 정비시기와 정비량이다. 기간고정형 계획정비(청색)이 총수명 주기동안 고장량이 변하는 것과 달리 확률기반형 계획정비의 정비량은 일정한 수준이다. 즉, 정비량의 편차가 적기 때문에 정비부대의 업무량 편차가 적다고 할 수 있다.

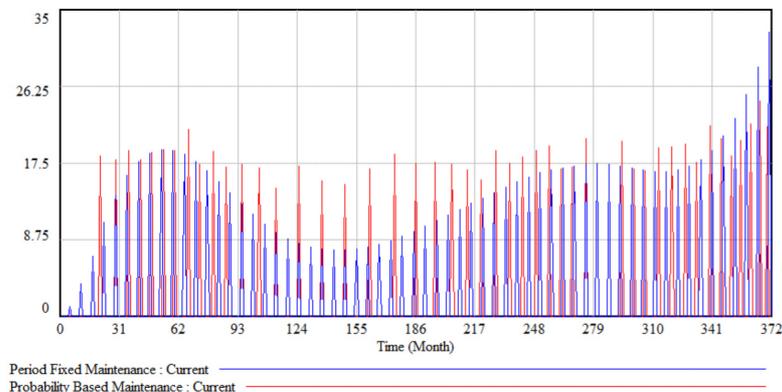


Figure 2. Comparison of Planned Maintenance between Two Maintenance Process

Choi *et al.*(2021)은 고장함수를 반영한 확률기반형 계획정비(Probability based maintenance)에 시스템다이나믹스를 활용하여 <Figure 2>과 같이 효과를 입증했다. 단 함정 1척으로 시뮬레이션을 수행하였기 때문에 현실과 같이 대기가 발생하는 상황을 고려하지 않았다는 한계가 있다. 해군 정비 수용능력은 제한적이다. <Figure 2>와 같이 확률기반형 계획정비를 수행하면 정비 주기가 매번 달라진다. 때문에 함정 여러 척의 정비주기가 같은 시기에 도래할 수 있다. 이런 경우, 정비부대 수용능력을 초과하여 대기가 발생할 수 있다.

대기행렬(Queuing)은 고객들이 도착하여 기다렸다가 서비스를 받고 떠나는 시스템이다. 대기행렬시스템은 서버(server)와 고객(customer)으로 구성된다. 서버의 수용능력 이상으로 고객이 도착하면 대기가 발생한다(Lee, 2006). 함정은 정비 주기가 도래하면 정비부대에 입고되어 계획정비를 진행한다. 정비를 마친 함정은 다시 임무로 투입된다. 비슷한 시기에 정비 주기가 도래하는 함정들이 다수일 경우 대기가 발생한다. 확률기반형 계획정비를 수행하였을 때 정비시기가 겹칠 수 있다. 이때 정비부대의 수용능력을 초과하게 되면 적절한 시기에 정비를 수행하지 못하고 대기하는 함정이 생길 수 있다.

이에 본 연구의 목적은 기간고정형 계획정비와 확률기반형 계획정비 모델을 구축하고, 대기가 발생하는 경우를 가정하여 확률기반형 계획정비의 효과를 검증하는 것이다. 기간고정형 계획정비 모델에서의 정비기간, 정비 주기, 임무기간 등 주요 파라미터들에 대해서는 현재 해군 정비정책을 참고하여 설정함으로써 현실과 유사한 상황을 부여하였다.

본 연구는 크게 5장으로 구성된다. 제2장에서는 과거에 연구된 해군의 정비정책(확률기반형 계획정비), 함정 엔진 고장 데이터에 대해 기술한다. 또, 고장함수의 추정과정과 대기행렬을 활용한 정비 관련 문헌들을 검토한다. 제3장에서는 기간 고정형 계획정비와 확률기반형 계획정비의 시스템 다이나믹스 모델을 구축하고 모델의 타당성을 검증한다. 제4장에서는

제3장에서 구축한 모델의 시뮬레이션 결과를 비교한다. 제5장에서는 연구의 결과들을 종합하여 시사점을 제공하고 향후 연구방향과 연구의 한계를 제시한다.

2. 이론적 배경

2.1 고장함수와 확률기반형 계획정비

본 연구에서는 Choi *et al.*(2021)의 연구에서 활용된 최근 10년간(2010~2019년) 발생한 해군 전투함정(5개 타입, 총 99척) 추진용 엔진의 고장 데이터를 분석 자료로 활용한다. 데이터에는 1990년대 도입된 함정부터 2010년 이후에 도입된 함정까지 포함되어 있다. Choi *et al.*(2021)은 고장 데이터를 분석하여 함정 수명이 약 31년인 것으로 확인하였다. Moon and Choi(2020)는 데이터를 활용하여 총수명주기간의 고장함수를 <Figure 3>과 같이 도출하였다. 가로축은 함정의 수명, 세로축은 비율 조정된 수명별 고장확률이다. 그래프 상 99개 초록색 선은 99척 개별 함정의 엔진 고장함수이다. 5개 보라색 선은 함정 타입별로 구분한 고장함수이며, 파란색 선은 엔진 전체를 대표하는 고장함수이다. 그래프의 형태는 과거의 연구에서 논의된 것처럼 육조모양과 유사하나 0~5년에 해당하는 부분은 육조모양의 형태와는 다르다. Choi *et al.*(2021)은 이를 데이터의 한계라고 하였다. 데이터는 군에서 수행하는 정비에 대한 데이터만 포함되어 있다. 해군 함정은 인수 후 일정기간 조선소로부터 하자정비를 받는다. 하자정비에 대한 데이터는 조선소의 소유이며, 연구의 목적으로 확보가 불가하다. 따라서, 데이터에는 조선소 하자정비의 데이터가 포함되어 있지 않다. 단, 해군 함정 승조원들은 경험적으로 인수 초반 잦은 고장에 따라 하자 정비량이 많다고 인식하고 있다(Choi *et al.*, 2021).

Choi *et al.*(2021)은 <Figure 3>과 같이 추정된 고장함수를 활

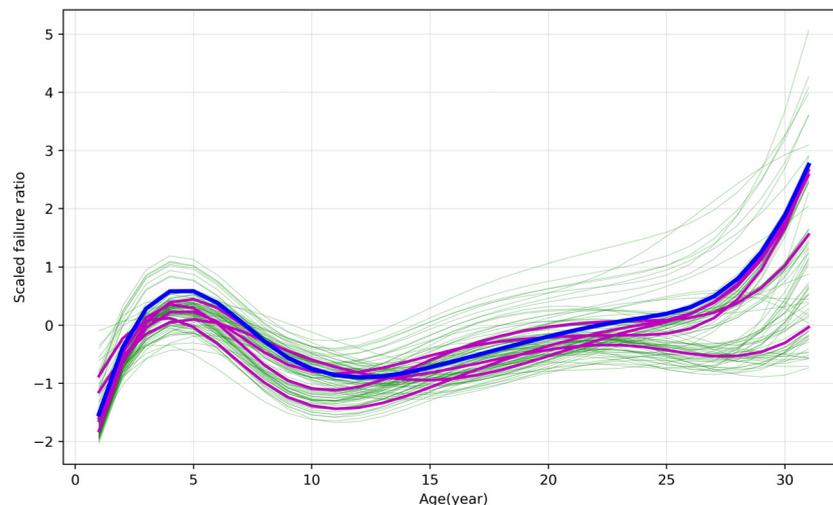


Figure 3. Failure Function of Naval Battleships

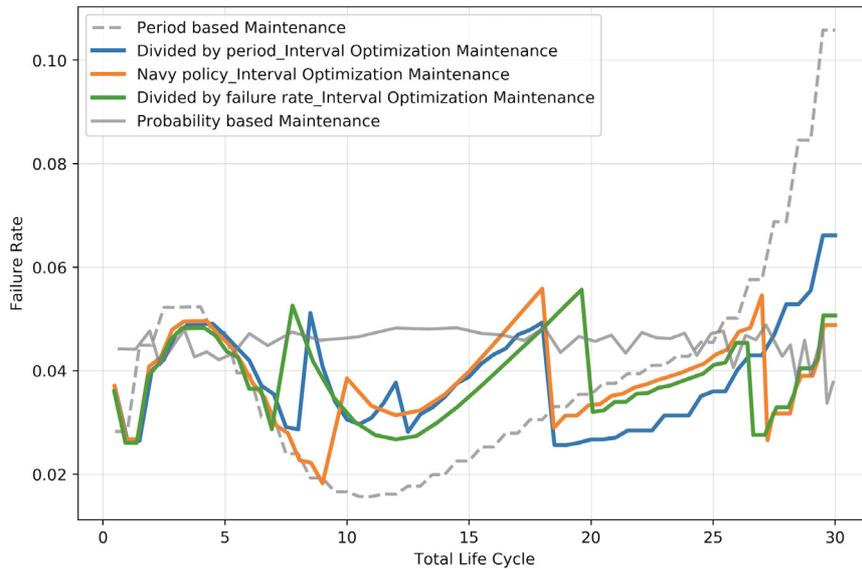


Figure 4. Comparison of Failure Rate between Maintenance

용하여 확률기반형 계획정비 제도를 제안하였다. 해군의 계획정비는 함정운용 기간을 기준으로 계획정비 입고시기가 결정된다(기간고정형 계획정비). 확률기반형 계획정비는 일정한 고장확률이 누적되었을 때 고장 확률을 계획정비 입고기준으로 삼는다. 이 기준은 기간고정형 계획정비를 수행하였을 때 총수명주기 동안 정비부대에서 수행하는 평균 정비량으로 적용하였다. 즉, <Figure 2>의 기간고정형 계획정비의 y 값들의 평균(평균 정비량)을 입고 기준으로 설정하였다. 이는 정비부대 정비능력을 고려한 것이다. 확률기반형 계획정비를 적용시 기간고정형 계획정비 대비 총수명주기 동안의 계획정비 횟수가 62회에서 48회로(22.6%) 감소하고, 작전 임무 중 노출되는 최대 고장확률이 26% 감소하였다. 정비부대의 정비량의 편차는 5.59에서 1.56로 72% 감소하였다. 군 데이터의 보안상의 문제로 단위가 조절되었지만, 여기서 정비량의 편차는 정비를 수행해야하는 고장개소 수의 편차로 이해할 수 있다. <Figure 2>와 같이 확률기반형 계획정비를 수행하면 정비시기가 유동적인 반면, 1회 정비를 수행하였을 때 정비량은 일정한 수준으로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 확률기반형 계획정비를 수행하면 계획정비 간격이 최대 2개월~15개월로 간격이 변한다. 이는 고장함수의 고장확률이 총수명주기동안 계속 변하기 때문이다. 계획정비 간격이 유동적으로 변하므로 정비계획 수립 및 정비소요에 대응하기 위해서는 높은 유연성이 요구된다. 한편 군은 정비 계획 수립에 높은 유연성을 가지기 쉽지 않기 때문에 현실 적용에 한계가 있다.

이와 같은 한계로 Choi *et al.*(2020)은 확률기반형 계획정비와 기간고정형 계획정비의 장점을 모두 고려한 간격 최적화 정비를 제안하였다. 간격 최적화 정비는 해군에서 총수명주기 동안 3회 수행하는 창정비(overhaul, 이하 OVHL) 시점을 고장함수를 활용하여 최적화시키고, 창정비 사이에서 계획정비 주기를 최적화 하는 계획정비 방법이다. <Figure 4>에서 초록색

선(Divided by failure rate_Interval Optimization Maintenance)에 해당하는 간격 최적화 정비의 OVHL 수행 시점은 수명 6.9, 19.6, 26.4년차이다. OVHL과 OVHL사이에서는 기간고정형 계획 정비를 수행한다. OVHL 시점과 OVHL 사이에서 수행하는 기간고정형 계획정비 주기가 동시에 최적화된다. 따라서 간격 최적화 정비 수행시 기간고정형 계획정비의 편리성과 고장함수가 적용된 확률기반형 계획정비의 장점을 동시에 취할 수 있다.

함정들은 정비부대의 능력을 고려하여 정비를 수행해야한다. 확률기반형 계획정비의 경우 고장이 많이 발생하는 노후 수명 구간에서 정비를 자주 수행해야 한다. 이전의 연구들에서는 여러 척의 노후 수명 함정이 잦은 정비를 수행할 때 정비부대에서 정비량을 수용할 수 있는지에 대해서는 고려되지 않았다. 정비능력을 초과한 정비량 발생시 정비를 위해 대기하는 함정이 발생할 수 있다. 대기 중인 함정은 작전임무를 수행해야 하며, 상대적으로 높은 고장확률에 노출된다. 고장함수를 적용한 계획정비의 실효성을 판단하기 위해서는 실제 해군에서 발생할 수 있는 대기의 상황을 고려한 시뮬레이션이 필요하다.

2.2 함정정비 대기행렬과 시스템 다이내믹스

함정 계획정비에 있어 도착과 서비스과정은 <Figure 5>과 같은 대기행렬시스템으로 나타낼 수 있다. i 척의 함정들($C_1 \sim C_i$)은 야전(Battlefield)에서 임무를 수행하다 자신의 계획정비 주기가 도래하면 정비부대(Repair shop)에 입고되어 정비를 받는다. 정비부대는 동시에 j 대의 함정을 정비할 수 있다($S_1 \sim S_j$). 고객인 함정 입장에서 야전은 임무수행 공간인 동시에 대기 공간이다. 정비를 받은 함정은 다시 야전으로 돌아가 다음 정비주기 도래시까지 임무를 수행한다.

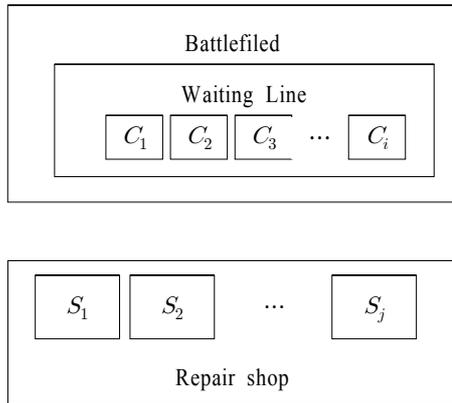


Figure 5. Queuing System in Naval Maintenance

대기행렬시스템의 성능척도는 평균시스템고객수(mean queue length), 평균대기고객수(mean queue size), 평균대기시간(mean waiting time), 평균체류시간(mean system sojourn time), 제공부하(offer load), 처리부하(carried load) 등 다양하다. 평균대기시간은 계획정비간 평균시간(mean time between maintenance, 이하 MTBM)은 함정이 총수명주기간 계획정비를 받기위해서 대기하는 시간의 평균이다. 장비의 MTBM이 클수록 총수명주기간 정비횟수가 줄어들고, 높은 가동률을 유지하기 때문에 신뢰도가 높다. 때문에 함정을 운용하는 작전부대 입장에서 MTBM은 중요한 의사결정 요소이다. 한편 정비부대 입장에서는 제공부하와 처리부하가 중요하다. 제공부하는 도착하는 고객(함정)들의 부하량(고장량)이며, 처리부하는 제공부하 중 정비부대가 실제 처리하는 고장량이다(Lee, 2006). 함정의 정비횟수와 정비기간은 규정화되어있다(해군정비관리규정, 2018). 정비부대에서는 함정의 고장량과 무관하게, 규정된 정비기간 동안 모든 정비를 수행해야 한다. 고장량이 많아 정비수행 능력을 초과하면 불완전정비로 이어질 수 있다.

해군 함정정비 관련 연구에서 대기행렬시스템은 다양하게 활용되었다. 관련된 연구로 Ko *et al.*(2013)은 서비스 시간이 단계형 분포(Phase-type distribution)를 따를 때, 최적 예약간격 산출에 대해 연구하였다. Ok *et al.*(2014)은 함정들의 입고상황을 포아송 과정으로 가정하고, 대기행렬을 활용하여 효율적인 함정정비 건설거 규모를 연구하였다. Kim and Yoon(2015)은 함정 고장 발생률을 포아송 과정으로 가정하여 해군 정비체계 최적 정비인력 할당 모형을 제시하였다. Cho and Yoon(2019)은 함정정비를 계획정비와 긴급정비로 구분하였다. 두 정비간 도착간격을 확률과정으로 분석하여, 고장확률이 큰 긴급정비에 우선순을 둔 건설거 운용수준에 대해 분석하였다. 기존 연구들은 해군 정비정책을 기반으로 도착분포를 포아송 과정, 확률적 과정 등으로 가정하여 수행하였으나, 확률기반형 계획정비와 같이 도착간격이 함정 수명에 따라 확률적으로 변화하는 상황을 가정한 연구는 없었다.

확률기반형 계획정비의 대기행렬에서 정비 시스템 내부의 함정(고객) 도착간격(누적 고장확률)은 계속 변한다. 동시에

고객(함정)과 서버(정비부대)는 지속적으로 도착과 정비완료의 피드백(feedback)을 주고받는다. 함정 정비 시스템은 여러 척의 함정들이 주는 정비시기 도래 신호와 정비부대의 수용가능 신호가 상호작용하며 작동한다. 정비는 정비시기 도래 신호를 받은 후 정비부대의 수용능력을 고려해서 이루어지게 된다. 이와 같은 인과관계(정비주기 도래에 따른 정비 시작)와 피드백(정비능력을 고려 입고 가능여부 판단)은 변수의 수가 많아질수록 복잡해진다. 인과관계와 피드백을 주고받는 변수의 수가 많다는 점을 고려하여 본 연구에서는 시스템 다이내믹스를 활용하여 모델을 구성하였다.

시스템 다이내믹스는 상호작용을 하는 수많은 변수로 이루어진 복잡계의 작동을 이해하고 시뮬레이션 하는데 사용된다. 시스템 다이내믹스 모델에서 시스템 내부의 구성요소들은 계량적인 정보를 갖는 변수로 표현된다. 변수들은 특성에 따라 저장변수와 유량변수, 보조(auxiliary)변수로 구분된다. 저장변수는 시간에 따라 누적된 값을 가진다. 저장변수는 시간의 흐름의 형태를 띄는 유량변수에 의해서 유입(inflow)과 유출(outflow)의 증감이 일어난다. 시스템 다이내믹스에서 이와 같은 변수들은 인과관계에 따라 상호작용하면서 복잡한 현상을 설명하게 된다(Sterman, 2000).

정비라는 시스템에 미치는 많은 변수들과 이들의 상호연관성을 고려하여 시스템 다이내믹스로 현상을 설명하고자 하는 노력들이 있었다. Fang and Zhaodong(2015)는 항공장비의 수명주기간 부품의 고장률 및 예방 정비율과 정비비용의 관계를 시스템 다이내믹스로 분석하였다. 고장, 정비, 비용의 관계 외에 정비의 흐름 자체를 분석하는 노력도 있었다(Mcdevitt *et al.*, 2005). 시스템 다이내믹스에서는 이와 같이 변수의 수가 많아지는 경우 특정 변수의 최적화에 유리하다는 장점이 있다. Linnéusson *et al.*(2018)은 정비 시스템의 가용성 최대화와 비용의 최소화라는 목적의 균형점(trade-off) 찾는 정량적 분석에 있어 시스템 다이내믹스의 다중목적 최적화(multi-objective optimization) 기능을 적용하였다. 함정과 같이 군용 장비의 최적화 대상은 일반적으로 장비의 가용성이 된다. Coyle and Gardiner(1991)의 모델에서는 잠수함의 운영 가용성을 평가를 위해 시스템 다이내믹스를 활용하였다.

확률기반형 계획정비를 평가하기 위해서는 함정의 총수명주기간 고장확률의 변화, 계획정비 수행기준, 정비부대 수용능력으로 인해 발생하는 대기, 함 운용 및 정비기간 등의 다양한 조건들을 고려해야 한다. 따라서 시스템 다이내믹스 방법론을 적용할 필요가 있다.

3. 계획정비 모델 구축

이 장에서는 대기행렬이 반영된 시스템 다이내믹스 계획정비 모델을 구축한다. 모델 가정과 변수구성에 대해 기술하고, 해군 정비정책과 비교하여 모델의 타당성을 입증한다.

3.1 기간고정형 계획정비와 확률기반형 계획정비 모델 구축

본 연구에서는 현재 해군에서 시행중인 계획정비 모델과, 해군 엔진 고장 데이터를 바탕으로 한 확률기반형 계획정비 모델(Choi *et al.*, 2021)을 시스템 다이내믹스로 구현하였다. 시스템 다이내믹스 소프트웨어는 벤심(Vensim)을 사용하였다.

<Figure 6>는 계획정비 모델이다. 모델은 크게 3개 섹터로 구분된다. 좌측은 고장함수(Failure function), 우측 상단은 확률기반형 계획정비(Probability Based Maintenance, 이하 PBM), 하단은 기간고정형 계획정비(Period Fixed Maintenance, 이하 PFM) 섹터이다. 기간고정형 계획정비는 해군의 정비정책을 표현한 것으로 본 연구의 기본 모델이 된다.

좌측 고장함수 섹터의 'Failure function'은 Moon and Choi(2020)의 연구에서 도출된 고장함수를 Lookup 기능을 활용하여 그래프로 표현한 변수이다. Lookup 기능은 고장함수와 같이 해군 전투함정의 고장 데이터를 바탕으로 도출된 특수한 비선형 관계를 그래프로 입력할 수 있다. 그래프의 x축상 시간의 흐름에 따라 y값인 고장량이 매 1주 단위로 'Failure rate'에 입력된다. 고장함수의 'Failure rate'에서 유량변수인 'PBM Failure input'과 'PFM Failure input'으로 입력된 고장량은, 각각의 저장변수인 'PBM Accumulated failure quantity'와 'PFM Accumulated failure quantity'에 매 1주 단위로 누적된다. 본 연구는 정비부대에서 수행하는 정비를 완전정비로 가정하였다. 완전정비란 입고시의 고장량을 100% 해소하는 정비를 의미한다. 때문에 각 계획정비 정책에 따라 정비부대에 입고되면, 누적된 고장량이 'PBM Failure output'와 'PFM Failure output'를 통해서 모두 해소된다. 고장량은 정비 완료시 0에서부터 누적된다.

본 연구는 기존 연구에 이어 여러 척을 대상으로 확률기반형 계획정비를 수행하였을 때 발생할 수 있는 대기에도 확률기반형 계획정비가 효과가 있는지 검증하는데 목적이 있다.

야전과 정비부대를 각각 저장변수인 'Battlefield'과 'Repair shop'으로 묘사해 추가하였다. 'Battle field'에서 임무중인 함정은 입고기준이 충족되면 'Repair shop'에 입고되어 계획정비를 실시한다. 이후 6주간의 규정된 정비기간('Regulated repair period')동안 정비를 마친 함정은 다시 'Battle field'으로 돌아가 임무 수행하기를 반복한다.

PFM은 현재 해군에서 수행중인 정비정책을 반영하여 함정 운용기간('Ship operating period')을 20주로 설정하였다. 함정은 'PFM Battle field'에서 임무를 수행한다. 임무수행 기간은 'Age after repair' 변수에서 측정된다. 임무수행 기간이 20주 이상이 되면 함정은 'PFM Repair shop'에 입고되어 6주간의 계획정비를 실시한 뒤 'PFM Battle field'로 돌아간다.

PBM에서 'Probability of maintenance criterion' 변수는 확률기반형 계획정비 실시 기준이다. 'Probability of maintenance criterion' 변수에 설정된 수준 이상의 고장이 'Accumulative failure rate'에 누적되면 계획정비를 실시한다. PBM에서 정비 판단 기준은 'Probability of maintenance criterion'에서 상수 값(47.46)으로 지정된다. 이 값은 PFM에서 수행하는 정비량의 총합을 평균 수리횟수로 나눈 값이다. 이는 PFM에서 총수명 주기간 수행하는 정비 총량을 PBM에 균등하게 배열한다는 의미이다.

3.2 계획정비 대기행렬 모델

2.1, 3.1절에서 언급한 바와 같이 Choi *et al.*(2021)은 해군 함정 1척을 기준으로 시뮬레이션을 했기 때문에, 하나의 정비부대에서 여러 척의 함정이 정비되는 현실을 반영하지 못했다. 대기행렬이 발생할 수 있는 현실의 정비상황을 묘사하기 위해 함정 수와 정비능력을 <Table 2>와 같이 가정하였다.

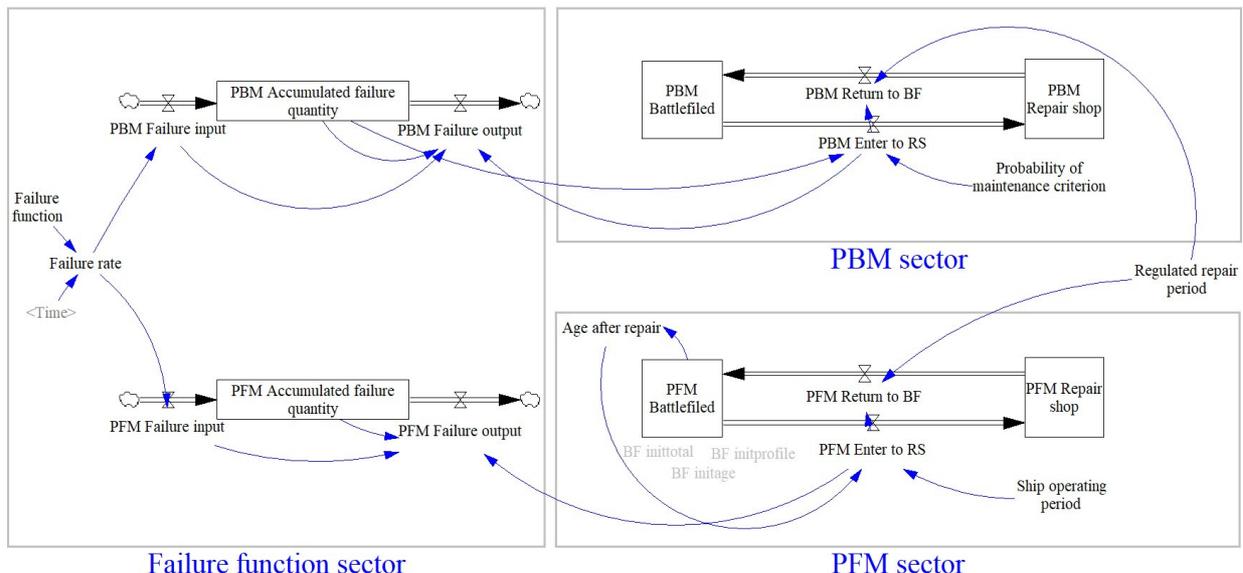


Figure 6. Planned Maintenance Model

Table 2. Research Scope and Assumptions

Total ships (Customer)	6 Ships
Repair Shop (Server) Capability	2 Ships
Age Difference of the Ships	1 Year

본 연구에서는 보안상의 문제로 함형이나 함정의 도입년도 등 구체적인 명칭과 수치는 논하지 않는다. 고객은 해군의 대형 전투함정(000-0 Class) 6척으로 한다. 서버는 정비부대이다. 서버수(정비부대 동시입고 가능 척수)는 작전부대 함정 가동률을 고려하여 2척으로 한다. 고객인 6척의 함정은 도입년도가 모두 다르다. 즉, 고장함수에서 도출되는 고장량도 모두 다르다. 본 연구에서는 000-0 Class의 해군 도입년도를 고려하여 함정 도입년도가 1년씩 차이 나는 상황을 가정하였다.

<Figure 7>는 <Figure 6>를 바탕으로 대기행렬과 가정상황들을 반영한 모델이다. 고객인 6척의 함정과 서버인 정비부대로 구성된다. 서버는 동시에 2척까지 정비 가능하다. 'RS Capacity' 변수는 서버수를 2대로 제한하기 위해 각 계획정비

입고 기준에 추가하였다.

기간고정형 계획정비의 정비판단 기준은 함정 운용기간('Ship operating period')이다. 운용기간이 20주를 경과하면 정비부대에 입고되어 6주간의 정비를 실시한다. 만일 정비부대의 동시입고 가능척수인 2척을 초과하여 다른 함정들에 입고 지연이 발생한 경우 정비주기 초과기간이 가장 긴 함정을 우선적으로 입고한다.

확률기반형 계획정비의 정비판단 기준은 함정 엔진 고장 데이터에 따라 누적 고장량이 설정된 수준('Probability of maintenance criterion')에 도달한 경우이다. 그러므로 확률기반형 계획정비의 정비 간격은 기간고정형 계획정비와 달리 불규칙하다. 총수명주기 간 고장량이 많은 구간에서 함정들의 정비빈도가 높아지면서 입고가 지연될 수 있다. 이 경우 누적 고장량이 가장 큰 함정을 우선적으로 입고한다.

모델에 있어 'Battlefield'는 함정의 임무공간인 동시에 정비 대기공간이 된다. 이는 함정의 정비판단 기준이 충족되었음에도, 대기로 인하여 정비를 하지 못하고 임무를 계속 수행하는 현실을 반영한 것이다.

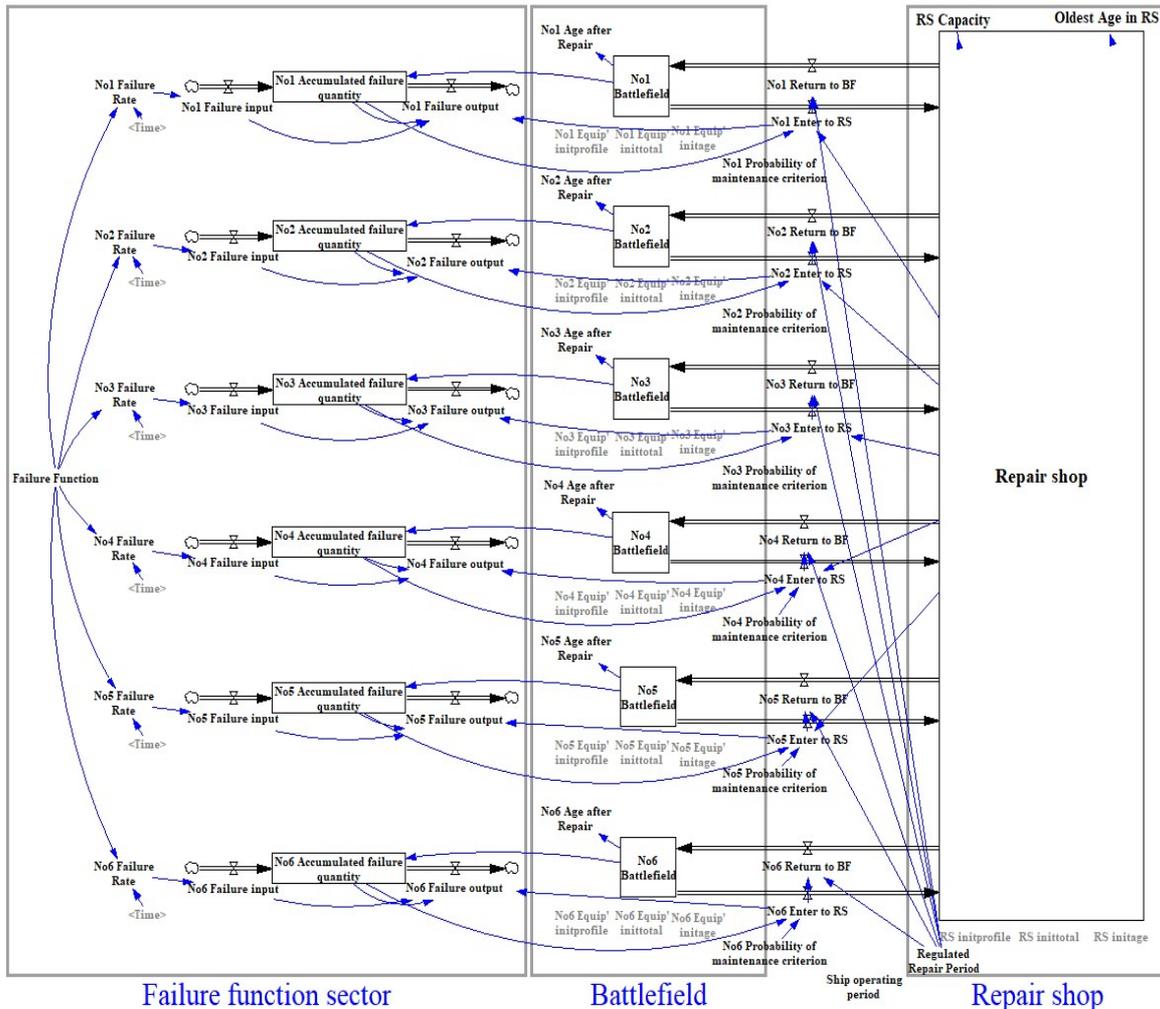


Figure 7. Planned Maintenance Model Using Queue

3.3 시뮬레이션 모델 타당성 검증

시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하기 위해서는 실제 정비 정책 결과와 시뮬레이션 모델의 결과를 비교해야 한다. 하지만 확률기반형 계획정비는 현재 군에 활용되지 않아 타당성을 확인하는 것은 쉽지 않다. 한편 비교모델인 기간고정형 계획 정비 모델은 현재 군에서 수행하고 있는 정비정책을 바탕으로 한 모델이기 때문에 타당성 검증이 가능하다. 따라서 본 연구에서 기간고정형 계획 정비 모델과 해군 정비정책의 총수명주기간 정비횟수 결과를 비교하여 타당성을 확인하였다.

해군 정비정책은 20주간 함 운용 후 6주간 정비를 수행하는 것이다. 26주 간격으로 함 운용과 정비를 반복하기 때문에 이를 총수명주기인 1,612주에 대입하면 총 62회의 계획정비를 수행한다. 기간고정형 계획정비 시뮬레이션 결과 해군 정비정책과 동일했다. 기간고정형 계획정비 모델은 해군 정비정책이 잘 반영되었다고 판단할 수 있다.

4. 결과 분석

본 장에서는 모델을 시뮬레이션하고 결과를 분석한다. 시뮬레이션은 함정의 총수명주기 31년을 주 단위로 환산하여 총 1,612주간 진행하였다. 모델의 유량변수인 ‘Enter to RS’는 함정이 야전에서 정비부대로 입고하기 위한 판단 기준이 된다. ‘Enter to RS’에는 정비판단 기준 파라미터(‘Ship operating period’, ‘Probability of maintenance criterion’)이 적용되어 함정과 정비부대의 상황을 고려하여 해당 함정의 입고가능 여부를 판단한다. 이론적 배경에서 제시한 총 수명주기간 정비 횟수 및 정비량, 계획정비 간 평균시간과 함정 가동률이라는 4가지 성과척도를 사용하여 결과를 비교하였다. 대기행렬 영향을 분석하고 시사점을 제시하였다.

4.1 총수명주기간 정비횟수 및 정비량

<Figure 8>은 총수명주기간 함정들의 평균 정비 횟수를 비교한 것이다.

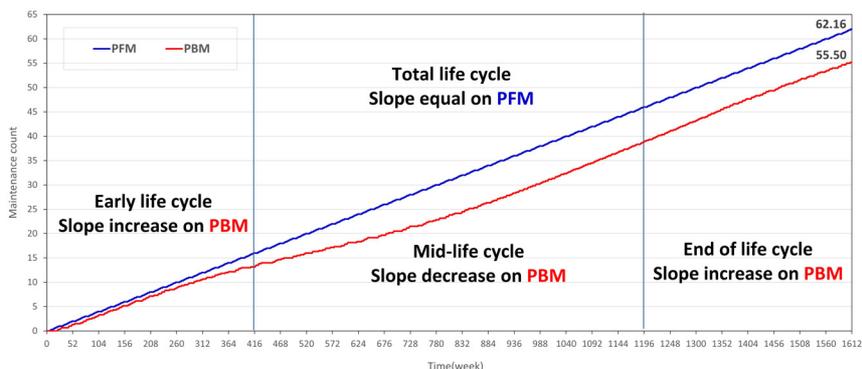


Figure 8. Comparison of Maintenance Count

계획정비를 1회 실시할 때마다 그래프 상 y축이 1씩 증가한다. 파란 실선으로 표시된 기간고정형 계획정비의 그래프는 20주마다 계획정비를 주기적으로 수행하므로 기울기가 일정한 형태를 보인다. 붉은 실선의 확률기반형 계획정비는 제2.1절 <Figure 3>에 제시된 고장함수 그래프에서 본 바와 같이, 고장확률이 높은 수명주기의 초반과 후반기간에 계획정비를 자주 수행하여 기울기가 상대적으로 크고, 고장확률을 낮은 안정화기간에는 적게 실시하여 기울기가 비교적 완만하다.

<Figure 9>는 대기행렬시스템 내부 전체 함정들의 계획 정비량을 비교한 것이다. 각각의 점을 기준으로 y축은 정비량이며 x축은 함정의 수명이다. 그래프의 각 함정들의 정비량 변화를 시각적으로 확인하기 위해 실선으로 연결하였다. 함정들의 구분을 위해 그래프 상 음영에 차이를 두었다. 적색 계열의 동그란 점으로 표시된 것이 기간고정형 계획정비를 수행하는 함정들, 청색 계열의 네모난 점으로 표시된 것이 확률기반형 계획정비를 수행하는 함정들이다. 각 점은 함정의 계획정비 수행 시점(x축)과 정비량(y축)이다.

확률기반형 계획정비는 누적 고장량이 설정된 기준(47.64)에 도달하면 정비를 수행하기 때문에 총수명기간 동안 정비량이 비교적 균일한 패턴을 보인다. 하지만 기간고정형 계획정비에서는 정비간 쌓인 고장량이 매번 다르며 정비량은 고장함수와 유사한 패턴을 보인다. 수명주기의 초기와 말기에 정비량이 많으며 안정화기에는 정비량이 비교적 적다. 고장량이 많아지는 수명 말기의 함정 여러 척이 동시에 정비부대에 입고되면 업무부하가 늘어 불완전 정비가 발생할 가능성이 있다. 반대로 정비 업무량이 적은 안정화기에서는 정비부대의 정비능력이 낭비된다.

각 정비정책의 통계값은 <Table 3>과 같다. 총수명주기간 실시하는 계획정비의 평균 횟수는 확률기반형 계획정비가 55.5회, 기간고정형 계획정비가 62.16회이다. 확률기반형 계획정비를 수행하였을 때 계획정비 수행횟수는 10.71%(6.66회) 감소하였다. 이는 정비예산 절감 측면에서 의미가 있다. 본 연구에서는 보안상의 문제로 구체적인 정비예산은 논하지 않는다. 단 계획정비에 소요되는 예산은 정비횟수에 비례하여 산정된다. 즉, 확률기반형 계획정비를 수행하면 수명주기간 정비예산을 약

10.71% 절감할 것으로 추정할 수 있다. 두 정책의 평균 정비량은 각 2,959와 2,961로 비슷하다. 하지만 총수명간 평균 정비량을 평균 계획정비 횟수로 나눈 계획정비 당 평균 정비량은 차이를 보인다. 확률기반형 계획정비의 평균 정비량(53.35)은 기간고정형 계획정비의 평균 정비량(47.59)의 1.12배이다. 이는 확률기반형 계획정비의 정비횟수가 줄어드는 만큼 한 번에 수행해야 하는 정비량이 평균적으로 많아졌음을 의미한다.

<Figure 9>의 그래프에서 시각적으로도 확인 가능하듯이, 정비량의 편차는 기간고정형 계획정비가 확률기반형 계획정비보다 상대적으로 크다. 평균값이 기간고정형 계획정비(18.18)가 확률기반형 계획정비(4.09)에 비해 4.44배 높다. 정비부대 운용 측면에서 기간고정형 계획정비가 확률기반형 계획정비보다 비효율적이다. 소요 정비인력의 큰 편차는 정비인력 할당문제로 이어질 수 있다. 기간고정형 계획정비는 매 계

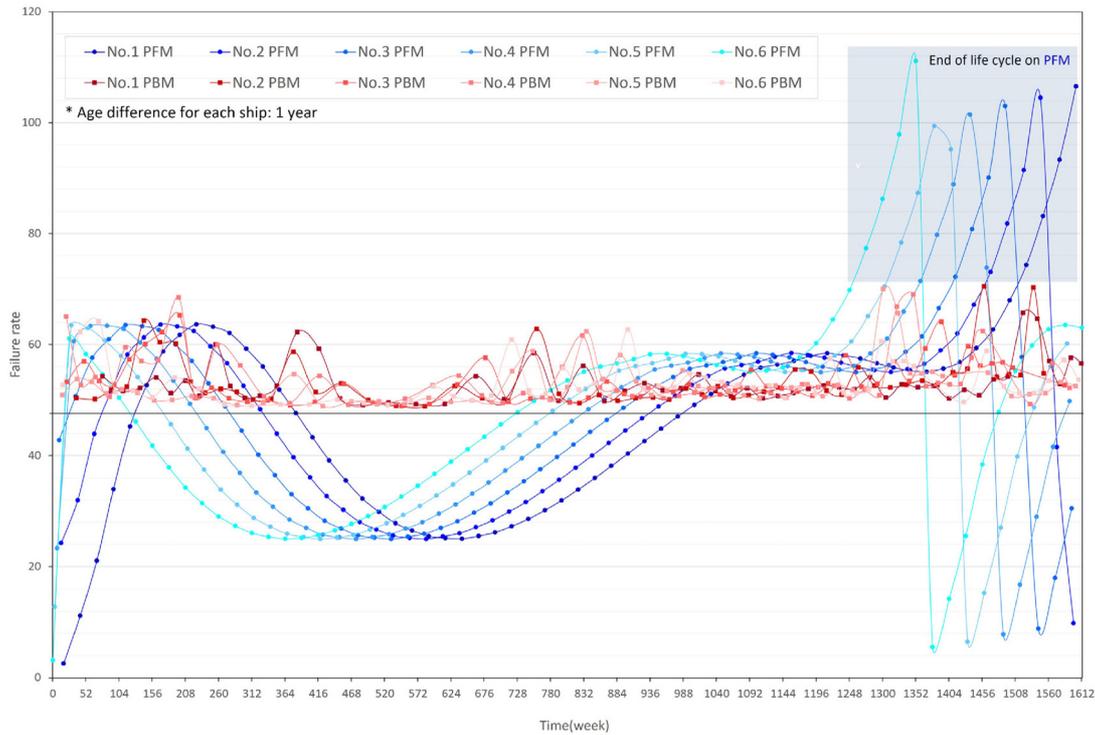


Figure 9. Comparison of Failure Rate

Table 3. Simulation Result Statistics

Maintenance	Total maintenance count	Maintenance rate			
		Total	Mean	Std.	
PFM	No.1	62	2,945	47.51	18.51
	No.2	62	2,973	47.95	17.31
	No.3	62	2,972	47.93	17.35
	No.4	62	2,942	47.46	17.76
	No.5	62	2,931	47.27	18.58
	No.6	63	2,988	47.44	19.55
	Total mean	62.16	2,959	47.59	18.18
PBM	No.1	56	2,978	53.19	3.64
	No.2	55	2,940	53.46	4.65
	No.3	55	2,944	53.52	3.86
	No.4	55	2,967	53.94	4.87
	No.5	56	2,957	52.80	3.89
	No.6	56	2,977	53.16	3.64
	Total mean	55.50	2,961	53.35	4.09

획정비시 수행하는 정비량이 다르기 때문에 인력 분배에 실패하면 불안정정비로 이어질 위험이 있다.

4.2 대기행렬 영향

대기행렬에 서버(정비부대)의 서비스율(Service rate)은 단위 시간당 한명의 서버가 서비스(정비)를 통해서 내보낼 수 있는 평균 고객(합정)수로, 평균 정비 시간의 역수이다(Lee, 2006). 두 연구모델의 정비부대는 동일한 능력과 서비스율을 갖는다. 합정 1척당 정비부대의 규정된 정비기간은 6주이다(합정정비 규정, 2018). 때문에 서버 1대당 주당 서비스율은 16.7% 이며, 수용능력(서버수)은 2척(대)이므로 정비부대의 최대 서비스율은 주당 33.3%이다. 즉, 2척 입고시 총 정비량의 1/3을 1주 단위로 정비할 수 있다. 이는 시스템적으로 1주에 최대 1/3척의 정비를 수행하는 것과 같다. 1년인 52주로 환산하면 정비부대는 연간 최대 17.33척까지 정비가 가능하다.

<Table 4>는 계획정비모델의 대기행렬 영향을 분석한 결과이다. 기간고정형 계획정비의 경우 연 2회 정비를 수행하며 6척 기준 연간 총 12회의 정비를 주기적으로 수행한다. 때문에 기간고정형 계획정비는 대기가 발생하지 않는다. 하지만 확률기반형 계획정비는 합정당 총수명주기간 평균 14.67회 대기가 발생하였다. 총수명주기간 대기기간은 합정당 평균 38.5주로 1

회 대기 발생시 평균 2.62주, 최대 8주까지 소요되었다. 이는 확률기반형 계획정비가 누적고장량에 따라 정비주기가 정해지며, 정비대기를 하고 있더라도 더 큰 고장량을 가진 합정이 발생하면 우선순위가 뒤로 밀리기 때문이다. 확률기반형 계획정비 합정의 입고시 고장량의 최대값은 64.15 ~ 70.46으로 기준(47.46)보다 최대 1.48배 높다. 단, 기간고정형 계획정비 합정의 입고시 고장량 최대값(99.4 ~ 111.11)보다 상대적으로 낮다.

임무수행 중 자체수리 불가한 장비고장이 발생하면 임무를 중단하고 균형으로 입항하여 긴급수리를 해야만 한다. <Figure 9> 우측 상단에 음영으로 표시된 부분(End of life cycle on PFM)과 같이 수명 말기의 합정이 몰려있을 경우 대기의 문제가 커질 수 있다. 한 합정의 긴급수리 소요는 계획수리를 앞둔 다른 합정들의 대기를 유발한다. 수명말기의 대기합정은 정비부대 입고전까지 임무를 수행한다. 큰 고장량을 가지고 임무를 수행할 경우 긴급수리 소요를 발생시켜 악순환을 초래한다. 즉 작전운용 측면에서 대기가 발생함에도 불구하고 확률기반형 계획정비가 기간고정형 계획정비보다 임무 성공 확률이 더 높다고 볼 수 있다.

4.3 계획정비기간 평균시간과 합정 가동률

<Table 5>는 계획정비기간 시간의 통계치이다. 기간고정형 계

Table 4. Analyze the Impact of Queues on the Planned Maintenance Model

Maintenance	Total delayed count	Delayed weeks			Max failure rate
		Total	Mean	Max	
PFM	No.1	-	-	-	106.53
	No.2	-	-	-	104.49
	No.3	-	-	-	102.97
	No.4	-	-	-	101.44
	No.5	-	-	-	99.4
	No.6	-	-	-	111.11
	Total mean	0	0	0	-
PBM	No.1	15	39	6	65.74
	No.2	18	44	8	70.46
	No.3	9	23	5	65.27
	No.4	19	57	7	68.99
	No.5	12	33	6	70.02
	No.6	15	35	5	64.15
	Total mean	14.67	38.5	2.62	-

Table 5. Comparison of Period between Maintenance

Maintenance	Period between maintenance			
	Mean	Min	Max	Std.
PFM	20	20	20	0
PBM	22.99	10	81	9.65

Table 6. Comparison of Operational Availability between Maintenance

Maintenance	Total available week	Total maintenance week	Available rate
PFM	1,239.28	372.72	76.87%
PBM	1,279	333	79.34%

획정기간 함정이 정비부대에 입고되는 평균시간이 20주로 일정하다. 확률기반형 계획정비간 함정의 평균시간은 22.99주이나 누적고장량에 따라서 정비부대에 입고되는 간격이 최소 10주에서 최대 81주까지로 불규칙하다. 확률기반형 계획정비의 계획정비 간 시간의 표준편차는 9.65주이다. 이는 확률기반형 계획정비를 수행하기 위해서는 정비계획 수립 시나 정비예산 편성 시 높은 유연성을 요구한다. 계획정비 간 평균시간은 함정 가동률에 영향을 미친다.

가동률(Available rate)이란 함정의 총 운용시간에 대하여 실제 가동시간(Actual available hour)을 백분율로 표시한 것이다(합동참모본부 군사용어사전, 2014). 함정의 총수명주기간 가동률은 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$Available\ rate = \frac{Actual\ available\ hour}{Total\ operating\ hour} \quad (1)$$

여기서 총 운용시간(Total operating hour)은 총 정비시간을 포함한, 함정 인도에서 퇴역까지의 총수명주기를 의미한다. 실제 가동시간은 총 운용시간에서 총 정비시간을 제외한 시간이다.

<Table 6>은 두 계획정비 간 함정 가동률을 비교한 것이다. 총 운용시간은 1,612주이다. 기간고정형 계획정비의 함정 가동률은 76.87%이고, 확률기반형 계획정비의 함정 가동률은 79.34%이다. 확률기반형 계획정비 수행시 함정 가동률은 약 2.47% 향상될 수 있다. 즉 확률기반형 계획정비가 기간고정형 계획정비보다 작전운용측면에 있어 함정의 불가동시간을 줄임으로써 전투 지속성을 보장할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 확률기반형 계획정비에 대해 연구한 Choi *et al.*(2021)의 연구에 대기행렬을 활용하여 현실 설명력이 높았다.

연구결과 현실과 같이 대기행렬이 발생하는 상황에서도 확률기반형 계획정비의 유효함을 다음과 같이 검증하였다. 첫째, 함정 당 계획정비 수행횟수는 6.66회(10.71%) 감소하였다. 이는 계획정비 예산을 11.03% 절감하는 효과이다. 둘째, 정비량의 편차는 정비부대의 업무량 편차와 직결된다. 시뮬레이션을 통해서 확률기반형 계획정비 시 정비량 편차가 약 4.4배 낮아짐을 확인하였다. 셋째, 계획정비 간 평균시간이 증가함에 따라 함정 가동률 2.47% 높아졌다.

본 연구는 다음과 같은 시사점을 제공한다. 계획정비 대기행렬과 같이 객체기반의 동적 행태를 시스템 다이내믹스에 적

용하여 시스템적 사고에서 관찰하였다. 검증된 확률기반형 계획정비의 효과성을 해군 정비정책 결정에 참고자료로 활용할 수 있다.

하지만 본 연구는 다음의 한계점을 가지고 있어 추가 연구를 통한 보완이 필요하다. 첫째, 함정 1척 가정한 기존연구에서 1개 함형으로 확대하여 현실 설명력을 높였으나, 해군 전체적으로 봤을 때 1개 함형은 극히 일부에 불과하다. 둘째, 해군의 정비는 세부적으로 부대정비, 야전정비, 장정비, 긴급정비로 분류된다. 하지만 분석 복잡도를 고려하여 연구대상을 야전정비로 한정하였다. 함정과 정비의 범위를 확대하여 시스템적 사고를 적용한 시뮬레이션을 한다면, 거시적인 관점에서 정비정책을 결정하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 둘째, 정비부대 관점에서 분석이 부족하다. 확률기반형 계획정비를 수행시 고장량이 적은 수명구간의 함정이 다수 존재할 경우, 정비부대의 가동률을 감소시킬 수 있다. 따라서 정비부대 관점에서 발생 가능한 정비의 비효율적 측면을 분석한다면, 해군 정비정책 수립에 보다 현실성있는 참고자료가 될 것이다. 끝으로 본 연구에서 확률기반형 계획정비의 수행기준(47.46)은 정비부대의 정비능력을 고려하여 기간고정형 계획정비의 평균 정비량으로 적용하였다. 하지만 경영학의 재고관리 시스템과 같이 정비량을 재고로 인식하여, P-System과 Q-System에 접목한다면 최적의 정비수행 기준을 찾을 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Cho, S. H., and 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.
- Choi, J. W., Moon, H. J., and Cho, W. Y. (2020), A Study on the Optimization of Planned Maintenance Intervals Considering the Life Cycle Failure Function, *Korean Journal of Logistics*, **28**(6), 57-70.
- Choi, J. W., Moon, S. A., and Cho, W. Y. (2021), A Study on the Probability-Based Planned Maintenance Effectiveness of Naval Combat Ships, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **47**(2), 190-198.
- Coyle, R. G., and Gardiner, P. A. (1991), A System Dynamics Model of Submarine Operations and Maintenance Schedules, *The Journal of the Operational Research Society*, **42**(6), 453-462.
- Fang, L., and Zhaodong, H. (2015), System Dynamics Based Simulation Approach on Corrective Maintenance Cost of Aviation Equipments, *Procedia Engineering*, **99**, 150-155.
- Joint Publication 10-2. (2014). *Joint · Combined Operations Military Terminology Dictionary*, ROK Joint Chiefs of Staff.
- Kim, S. W., and Yoon, B. K. (2015), A Study on the Optimal Allocation

- of Maintenance Personnel in the Naval Ship Maintenance System, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **16**(3), 1853-1862.
- Ko, J. W., Kim, G. G., and Yun, B. K. (2013), A Study on the Optimal Appointment Scheduling for the Ship Maintenance with Queueing System with Scheduled Arrivals, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, **38**(3), 13-22.
- Lee, H. W. (2006), *Queue theory: Probabilistic Process Analysis* (3Ed). Sigma Press. Seoul.
- Lee, S. J. (2019), *Military Logistics*, Hankyungsa. Seoul.
- Linnéusson, G., Ng, A. H. C., and Aslam, T. (2018), Quantitative Analysis of a Conceptual System Dynamics Maintenance Performance Model Using Multi-objective Optimisation, *Journal of Simulation*, **12**(2), 171-189.
- Mcdevitt, M. E., Zabarouskas, M. W., and Crook, J. C. (2005), Workflow Ship Repair, *Journal of Simulation, Military Operations Research*, **10**(3), 25-43.
- Moon, H. J., and Choi, J. W. (2020), *Hierarchical Spline for Time Series Forecasting: An Application to Naval Ship Engine Failure rate*, *Applied AI Letters*.
- Ok, K. C., Cho, S. J., Jeon, J. H., Yang, J. Y., and Cho, Y. C. (2014), A Study on an Efficient Size Dry Docks for Warship Maintenance using Queueing Problem, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, **40**(4), 428-434.
- ROKN Regulation No. 2351. (2018), *Navy Ship Maintenance Regulations*, ROKN headquarters.

Sterman, J. D. (2000), *Business Dynamics*, McGraw-Hill, New York.

저자소개

박정서: 해군사관학교에서 2010년 문학사, 군사학사 그리고 2022년 국방대학교 국방관리학과 석사학위를 취득하였다. 현재는 대한민국 해군 잠수함사령부 최무선함 기관장으로 재직 중이다. 연구분야는 Maintenance Engineering, System Dynamics이다.

문성암: 연세대학교 경영학과에서 92년 학사, 94년 석사, 99년 박사학위를 취득하였다. 현재 국방대학교 국방관리학과 교수로 재직 중이며, 안보문제연구소 국방관리센터장, 국방부 정책자문위원, 로지스틱스 학회 및 생산관리학회 부회장을 겸임하고 있다. 연구분야는 Behavior Operation Management, Supply Chain Management이다.

최진우: 해군사관학교 전산학과에서 2009년 이학사, 군사학사 그리고 2019년 국방대학교 국방관리학과 석사학위를 취득하고 박사과정에 재학 중이다. 연구분야는 Failure function, Bayesian statistics이다.