



항공모함 운용 자원을 고려한 시뮬레이션 기반 공간 활용 연구

이재성^{1,4}·유원선^{1,†}·홍사영³·최완수²
충남대학교 자율운항시스템공학과¹
충남대학교 미래모빌리티시스템연구소²
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소³
한화오션(주)⁴

A Simulation-Based Study on Spacial Utilization Considering Resource Operations on Aircraft Carriers

Jae Seong Lee^{1,4}·WonSun Ruy^{1,†}·Sa Young Hong³·Wan-Soo Choi²
Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University¹
Research Institute of Future Mobility System, Chungnam National University²
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering³
Hanwha-Ocean⁴

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

An aircraft carrier is a warship with a flight deck and hangar that enables at-sea STOVL operations under strict space and resource constraints, making operational efficiency a critical design factor. This study develops a discrete event simulation (DES) framework to evaluate space utilization in both the flight deck and hangar. The framework models STOVL aircraft launch and recovery cycles, resource allocation (tractors, refueling, and rearming), and collision avoidance paths using the No-Fit Polygon (NFP) algorithm. Simulation results highlight two major findings. First, on the flight deck, Gantt chart analysis revealed that initial spotting and respotting strategies strongly influence sortie throughput, as bottlenecks from tractor queues and turnaround tasks directly delayed subsequent launches. Second, in the hangar, aircraft orientation and width significantly affected average handling time (AHT) and deployable capacity. A 26m width with 90o orientation minimized towing interference and reduced movement time, while a wider 33m layout allowed greater capacity but did not guarantee shorter handling times. These findings underscore the need for co-optimization of flight deck scheduling and hangar layout at the early design stage. The proposed DES-based method quantitatively supports such trade-offs and provides a foundation for future studies on unmanned aircraft integration and AI-driven operational planning.

Keywords : Aircraft carrier operations(항공모함 운용), Space utilization simulation(공간 활용 시뮬레이션), Discrete event simulation(DES, 이산 사건 시뮬레이션), Average handling time(AHT, 평균처리시간), Gantt chart analysis(간트 차트 분석), No-Fit Polygon algorithm(NFP 알고리즘)

1. 서론

항공모함은 이·착함, 급유, 무장, 점검·정비, 관제·지휘 등 공중전력 운용의 전 과정을 함상에서 수행하는 ‘해상기지’로 기능한다. 다양한 영향인자를 고려한 작전 시나리오를 통해 소티(함재

기가 이함 후 임무를 수행하고 착함하는 출격률)가 산출된다. 비행갑판 구역과 격납고를 통해 함재기를 운용하는 함정의 전투력은 소티 생성률(Sortie Generation Rate, SGR)로 판단되며, 수십대의 함재기 운용으로 발생하는 한정된 공간 제약과 자원 경합이 핵심 병목을 좌우한다. 비행갑판과 격납고(정비구역 포함)는 제한

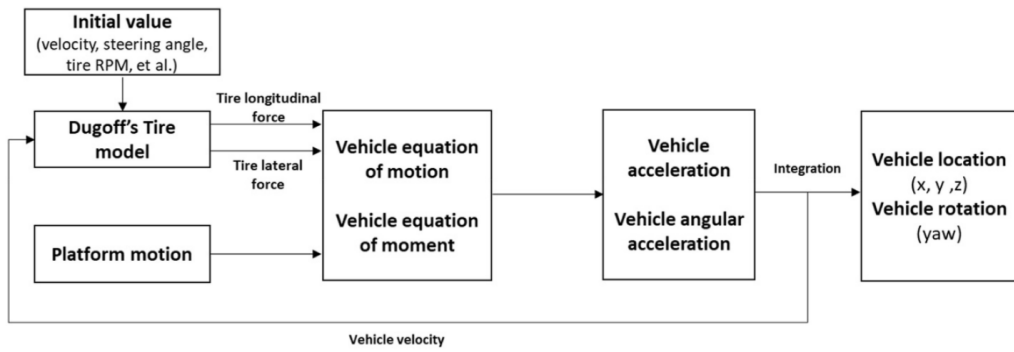


Fig. 1 Aircraft deck movement simulation process(Yoo et al., 2024)

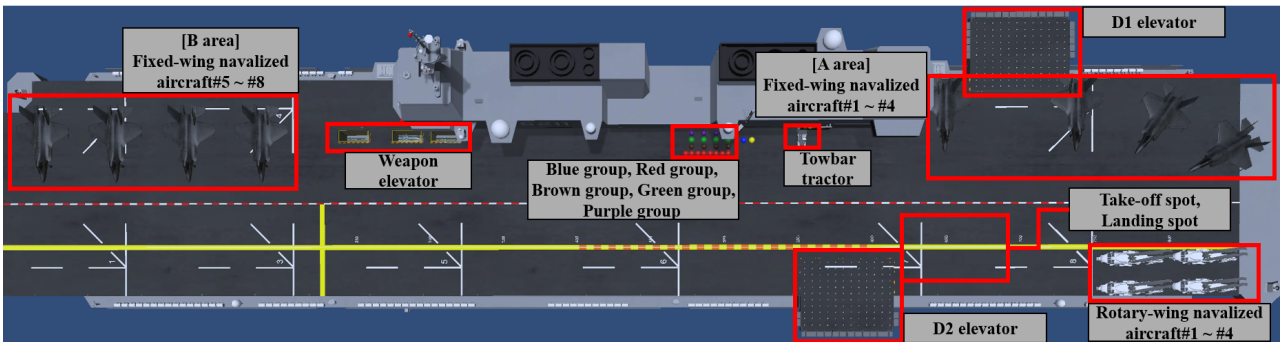


Fig. 2 Flight deck area operational resources

된 면적과 다수 자원의 동시 운용, 함정 6자유도 운동(roll, pitch, heave 등)의 영향으로 운용 복잡도가 높다.

본 연구는, 기존의 공간을 활용한 함재기 운용 시뮬레이션 개발(Lee and Ruy, 2024)의 병행 연구이며, 복합적인 제약을 정량적으로 다루기 위해 이산 사건 시뮬레이션(Discrete Event Simulation, DES)과 동역학 기반 물리 모델(Yoo et al., 2024, Fig. 3)을 No-Fit Polygon(NFP) 충돌 검출을 통합한 공간 활용 시뮬레이션을 제안하고, 설계 변수(격납고 폭, 함재기 배치각) 및 운용 시나리오(이함, 착함, 정비, 이송)에 따른 운용 효율성을 분석할 수 있는(Lee et al., 2024) 시공간 통합 DES 모델 개발과 활용 성능 개선 효과를 검증하는 것을 목적으로 한다. 연구 범위

는 소티 산출 시 영향자인 비행갑판과 격납고로 한정한다. 비행갑판에서는 이·착함 및 운용 자원(무장, 점검, 급유, Tractor)의 동선을, 격납고에서는 폭과 함재기(단거리 이함 및 수직 착륙(Short Take-off/Vertical Landing, STOVL) 항공기) 주기 배치각 변화에 따른 배치 가능 대수, 충돌 빈도, 이동 소요 시간을 분석한다. 논문 구성은 제2장에서 항공모함 공간 활용 현황과 선행 연구를 검토하여 본 연구의 차별성을 도출하고, 제3장에서 DES, NFP 기반의 통합 모델 설계를 제시하며(개념, 변수, 프로세스, 통합 구조), 제4장에서는 시뮬레이션 결과를 분석하고, 5장에서 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 항공모함 공간 활용 현황 및 선행연구 분석

2.1 항공모함 공간 활용 현황

항공모함의 비행갑판은 함재기의 이함, 착함, 재배치, 무장 장착, 급유 등 다수의 작업이 병행되는 공간으로, 각 작업 간 간섭 가능성이 높다. 비행갑판에서는 이함 전에 STOVL 함재기와 Towbar tractor가 견인하여 이함 구역으로 이동시키며, 착함 후에는 주기 구역으로 이동시킨다. 격납고에서는 STOVL 함재기가 D2 엘리베이터를 통해 이동 시 Towbar-less tractor가 격납고에 주기 시키며, 비행갑판으로 이동 시 함재기를 D1 엘리베이터에 주기 시킨다. STOVL 함재기 운용 시에는 이·착함 포인트, 대기

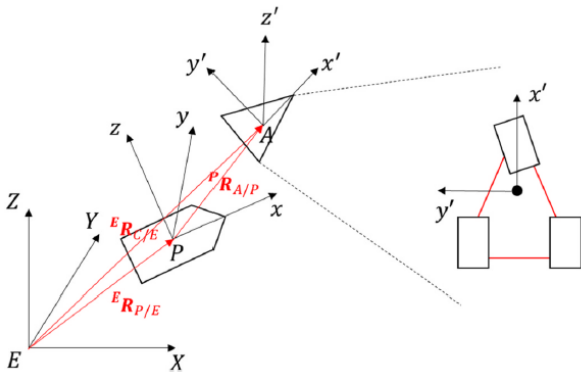


Fig. 3 Schematic of the coordinate systems and directional vector(Yoo et al., 2024)

Table 1 Comparison of this study with the state of the art

Previous studies	Scheduling	Space restriction	Hangar	Resource	Collision	Dynamic	Visualization
Cui et al. (2022)	X	O	X	O	X	O	X
Su et al. (2018)	O	X	X	X	X	X	X
Yang et al. (2021)	O	O	X	X	X	X	X
Oh and Woo (2024)	O	X	X	X	X	X	O
This study	O	O	O	O	O	O	O

위치, 이동 경로가 상호 중첩되기 때문에, 자원의 효율적 배치와 이동 동선 최적화가 필수적이다. 실제 운용에서는 비행갑판을 전방, 중간, 후방의 기능 구역으로 나누어 운영하며, 각 구역에는 함재기와 지원 장비의 위치가 엄격히 관리된다. 그러나 임무 양상 변화나 갑작스러운 우선순위 변경 시, 경로 재계산과 자원 재배치에 소요되는 시간이 병목 현상의 주요 원인이 된다.

격납고는 나타난 것처럼 협소한 공간에 다수의 함재기가 밀집되어 배치(Johnston, 2009; Fig. 4)되며, 비행갑판과 D1, D2 엘리베이터(Fig. 2)를 통하여 운용된다. Tractor와 함재기 간 동역학 특성, 주기 각도, 구역 폭에 따라 이동 가능 경로가 크게 달라진다(Fig. 1). 정비 후 비행갑판으로의 이송은 D1 엘리베이터, 비행갑판에서 격납고로의 이송은 D2 엘리베이터를 통해 이루어진다. 이러한 환경에서는 충돌 위험이 높고 경로 재계산이 빈번하게 발생한다.

2.2 공간 활용 시뮬레이션 연구 동향 및 본 연구의 차별성

기존의 국내외 항공모함 공간 활용 관련 연구들은 비행갑판과 격납고를 동시에 고려한 시뮬레이션의 통합적 개발이 부족하였다(Table 1). 기존 연구는 항공모함 또는 상륙함에서 함재기를 활용한 소티 생성률을 계산하는 논문을 조사하였으며, 예를 들어 Cui et al. (2022)은 항공기 함대의 경로 계획 최적화를 연구했으나 격납고와 엘리베이터를 포함한 이동의 공간적 제약을 고려하지 못한 한계가 있었다. 또한, Su (2018)는 항공모함 비행갑판의 작전 스케줄링을 연구했지만 공간 제약과 자원 관리의 동적 요소를 종합적으로 반영하지 못하였다. Oh (2023)는 소티 생성률 예측 연구에서 공

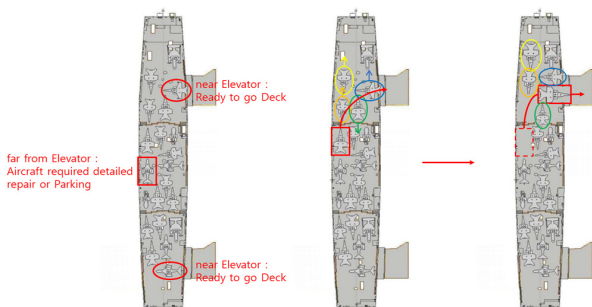


Fig. 4 Example of fixed-wing naval aircraft arrangement and securing a movement path for a target aircraft on a confined hangar deck(Johnston, 2009)

간 활용 및 이동 경로 최적화가 부족하였다. 본 연구는 기존 연구의 한계를 보완하여 제한된 공간에서 차량 동역학을 활용(Song and Park, 2021)하고 자원 제약, 함상 환경(풍향, 풍속, 파향, 파도 상태; Lee et al., 2024)을 모두 고려한 통합 시뮬레이션 모델을 개발함으로써 선행연구와 명확한 차별성을 확보하였다.

3. 연구 방법론

3.1 DES 개념 및 적용 방법론

DES는 사건이 발생하는 순간에만 시스템 상태가 변하는 비연속적 시간 진행 방식의 시뮬레이션이다. 항공모함의 경우 제한된 공간 내에서 여러 자원이 복잡한 상호작용을 이루므로, 각 사건 발생 시점을 중심으로 효율적인 운용 자원 관리가 요구된다. 따라서 DES는 항공모함 운용 환경에서 함재기 배치와 운용 스케줄링의 최적화를 위해 매우 적합한 방법론이다. 그 이유는 함정 내 다양한 자원이 SimPy를 활용하여 구현한 DES가 복합적으로 운용될 때 효과적인 방법론(Jung et al., 2024)이기 때문이다. 기존 선행 연구에 공간 활용을 통한 NFP 충돌 정밀 검사 분석을 적용시켜 항공모함 및 상륙함 내 비행갑판과 격납고의 다양한 설계 활용안을 제시할 수 있는 연구이다. SimPy는 Python 기반의 프레임워크로서 환경(environment), 프로세스(process), 자원(resource)을 정의하고, 세 가지 주요 구성요소를 활용하여 시스템을 모델링한다. 본 연구에서는 항공모함 비행갑판과 격납고에서 운용 자원의 효율적 관리를 위해 DES 모델을 설계하고 이를 적용하였다. 또한, 함재기의 이·착함 구역 이동과 운용 자원의 무장 탑재, 급유 등 임무 수행 시 다수의 좌표 및 각도 이동과 임무 프로세스 및 확률 분포 변경을 DES를 통해 시뮬레이션 함으로써 최적화된 소티 생성률을 산출하였다.

3.2 시나리오 기반 공간 활용 시뮬레이션 수행 전략

본 연구의 시나리오는 영국 Babcock사의 퀸 엘리자베스급 항공모함 운용 절차(Jung et al., 2024)를 반영하여 비행갑판 운영 시나리오와 격납고 운영 시나리오로 구성하였다. Fig. 7은 본 연구의 공간 활용 시뮬레이션에서 설계된 SimPy 기반 DES 프로세스를 나타내며, 작전 시나리오의 구조를 어떻게 설계하였는지 개략적으로 나타낸다. 즉, Sortie 산출을 위한 사이클을 SimPy 기반 프로그래밍을 가시적으로 나타낸 흐름도이다.

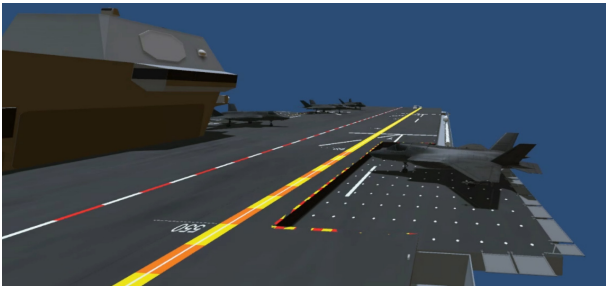


Fig. 5 Aircraft movement from flight deck to hangar via D2 elevator

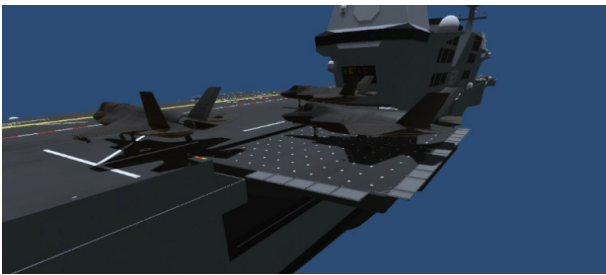


Fig. 6 Aircraft movement from hangar to flight deck via D1 elevator

- 비행갑판 시나리오: 무장 장착(Red Group) → 이륙 전 점검(Brown Group) → 이함 → 착함 → 착륙 후 점검(Green Group) → 급유(Purple Group) → 필요 시 D2 엘리베이터로 격납고 이송(Fig. 5).
- 격납고 시나리오: 목표 함재기 지정 → 충돌 가능성 평가(NFP) → 회피 경로 생성 → 선행 함재기 이동 → 목표 함재기를 D1 엘리베이터로 비행갑판 이송(Fig. 6).

3.3 공간 활용 시뮬레이션 모델 설계

본 연구에서 제안하는 공간 활용 시뮬레이션은 항공모함의 비

행갑판과 격납고를 통합적으로 모델링하여 제한된 공간에서 함재기와 운용 자원이 상호작용하는 복잡한 작전 환경을 재현하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 시뮬레이션 구조는 DES 기반으로 설계되었으며, 비행갑판 모델과 격납고 모델을 상호 연계하는 통합 구조를 적용하였다(Fig. 8). 모델은 무장 장착, 이륙 전 점검, 이함, 착함, 착륙 후 점검, 급유 절차를 포함한다.

격납고 모델은 충돌 회피 이동, 정비, 엘리베이터 이송 절차를 포함하며, 비행갑판 모델과 상호 데이터 교환을 통해 연계된다. 각 모델의 프로세스는 Fig. 7와 Fig. 8에 제시된 흐름도와 같이 설계되었으며, 경로 생성 알고리즘은 장애물(Island house, Weapon elevator, Resource zone)을 회피하도록 휴리스틱 접근 방식을 사용하였다.

Fig. 8은 복잡한 함정 내 다양한 운용 자원이 프로세스에 따라 비행갑판과 격납고를 엘리베이터를 통해 사이클이 순환 후 Sortie를 산출한다는 것을 의미하며, 각 프로세스에 필요한 운용 자원을 알 수 있다. 아래 비행갑판 내 함재기의 프로세스를 나타낸다.

- Orange box: 이함 전 작업
- Green box: 이함 작업
- Blue box: 착함 후 작업

Table 2는 본 연구의 공간 활용 시뮬레이션에서 사용된 운용 자원과 각 자원의 임무를 나타내며, 본 연구에서는 영국의 퀸 엘리자베스급 항공모함의 운용 데이터에 기반한 확률 분포를 적용(Jung et al., 2024)하여 현실성을 높였다. 함재기 공간 활용 시뮬레이션(비행갑판과 격납고) 모델은 UDP Broadcast 통신 기반 DIS(Distributed Interactive Simulation) 표준을 통해 함재기 관제 임무 시뮬레이션, 함재기 거동 시뮬레이션과 연동하여 총 3개의 시뮬레이션이 통합하여 연동된다(Fig. 13), 본 연구의 주된 대상인 비행갑판과 격납고 시뮬레이션은 하나의 컴퓨터 또는 IP Address가 연결된 컴퓨터에서 명령 체계를 주고받을 수 있는 TCP/IP 통신을 활용하여 연동하였다. 연동 시 OpenDIS(Distributed Interactive Simulation) 통신 프로토콜을 활용하였다. 누구나 활용할 수 있도록 공개된 통신 프로토콜로 주로 군사



Fig. 7 Discrete event simulation process for space utilization simulation using SimPy

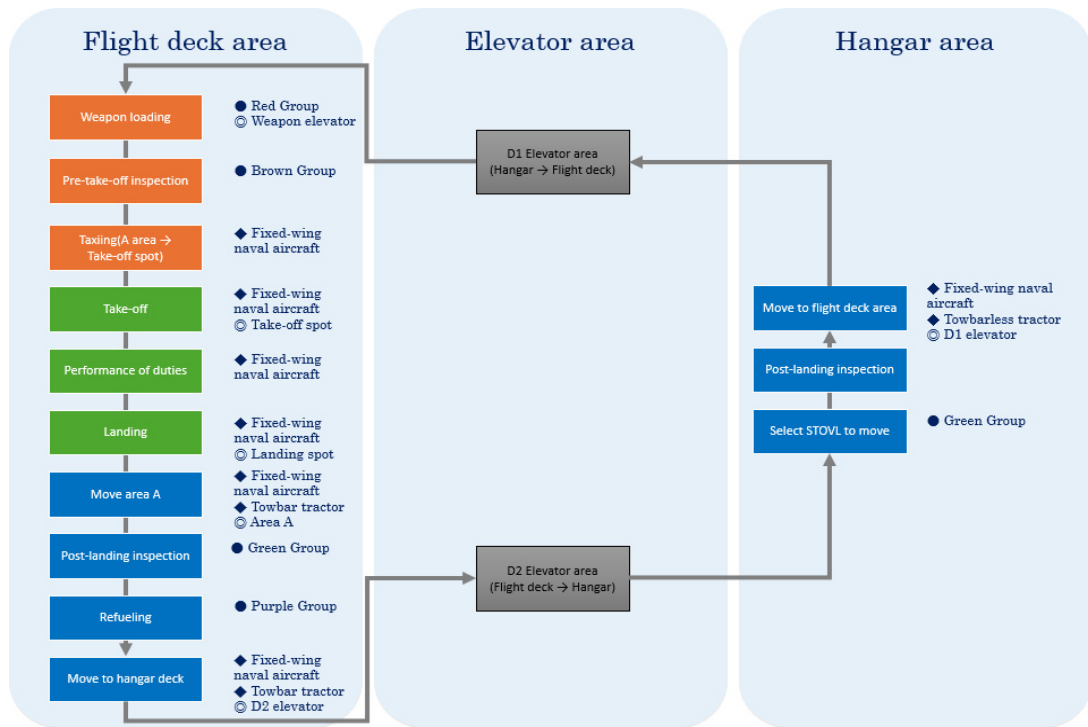


Fig. 8 Process in all areas of the aircraft carrier

Table 2 Operational resources and associated missions for space utilization simulation

Operational resources	Mission
Blue group	Personnel required to move a fixed-wing naval aircraft
Red group	Number of teams required to arm fixed-wing naval aircraft before take-off
Brown group	Number of teams required for final inspection of a fixed-wing naval aircraft before take-off
Green group	Number of teams required to inspect a fixed-wing naval aircraft after landing
Purple group	Number of teams required to refuel a fixed-wing naval aircraft after landing
Take-off spot	Take-off coordinates for a fixed-wing naval aircraft
Landing spot	Landing coordinates for a fixed-wing naval aircraft
Towbar tractor	Tractor used to move fixed-wing naval aircraft with a towbar
Towbar-less tractor	Tractor used to move fixed-wing naval aircraft without a towbar
Elevator	D1 Elevator: Moves a fixed-wing naval aircraft from hangar to flight deck D2 Elevator: Moves a fixed-wing naval aircraft from flight deck to hangar

작전과 미군에서 사용한다.

국제 표준은 IEEE 12780이며, 네트워크상에서 PDU(Packet Data Unit)를 주고받아 상태를 동기화 시킨다. 모델 설계 시 자원 목록, 작업 시간 분포, 이동 속도 등의 세부 값은 시뮬레이션 환경 구성(4.1절, Table 2, 3)에 정의되어 있으며, 본 절에서는 구조와 알고리즘 중심으로 설명하였다. 항공모함의 격납고는 다수 함재기가 밀집된 공간으로 충돌 위험이 높다.

3.4 충돌 검사를 위한 NFP 알고리즘 구축

본 연구에서는 NFP 기법을 기반으로 격납고 충돌 검사를 수행

Table 3 Probability distributions for mission execution time of operational resources(Jung et al., 2024)

Probability distribution	Operating resources
Uniform distribution	Red Group Green Group
Triangular distribution	Brown Group Engine start Purple Group

하였다. NFP 기법(Fig. 10)은 두 개의 다각형 형상이 서로 겹치지 않으면서 가능한 모든 상대 위치를 탐색하여, 배치 가능 영역

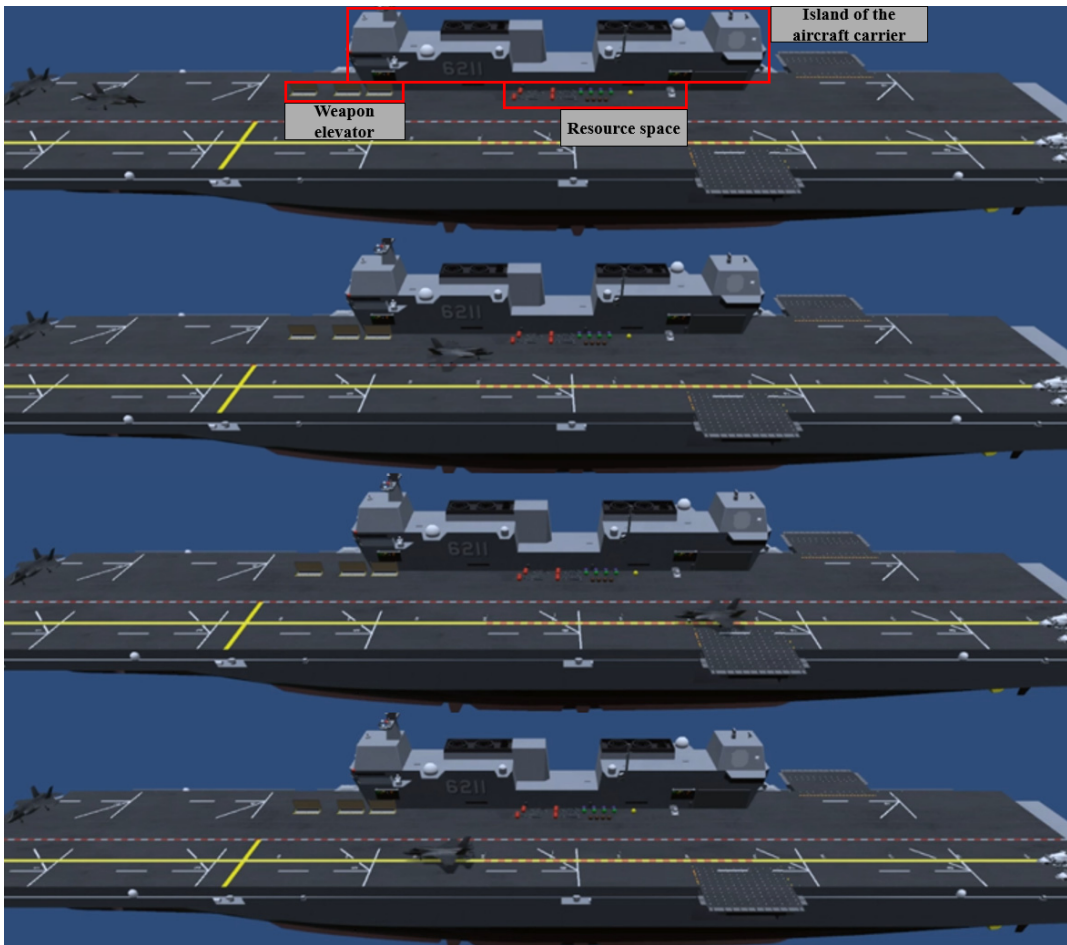


Fig. 9 Movement of a fixed-wing naval aircraft from B area to take-off spot on the flight deck

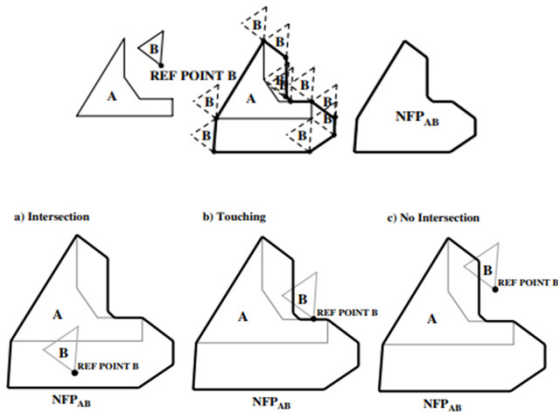


Fig. 10 NFP overview(Ryu and Kim, 2004)

과 충돌 가능 영역을 구분하는 방법이다(Ryu and Kim, 2004). 이를 항공모함 격납고 모델에 적용하여, 함재기의 노즈콘(Nose cone)을 충돌 판단 기준점으로 설정하고 이동 경로 상에서 다른 함재기나 장애물과의 충돌 여부를 실시간으로 판단하는 것을 그림에서 나타낸다(Fig. 11). 함재기의 이격거리는 50cm로 이동 시 자색 폴리곤이 다각형 형태의 물체 간 충돌 가능 영역을 수학적

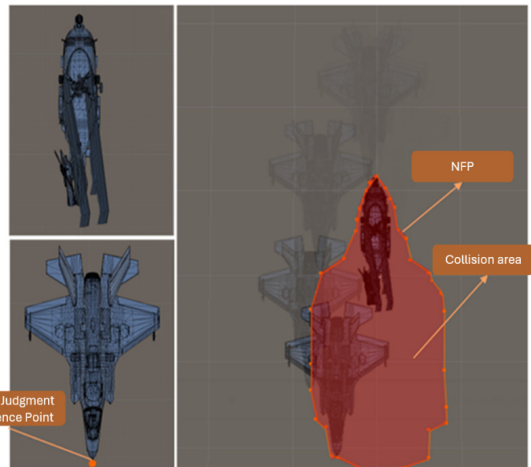


Fig. 11 Collision probing algorithm

으로 연산하여, 두 객체 간의 겹침 여부를 판단하는 알고리즘이다. 본 연구에서는 항공기 및 자원을 다각형으로 모델링하고, 대상 항공기의 전방 경로를 NFP 방식으로 탐색함으로써 이동 전 단계에서 충돌 가능성을 실시간 검출한다. 충돌 가능성이 감지되면, 기존 경로는 폐기되고 감지된 선행 이동이 필요한 함재기가

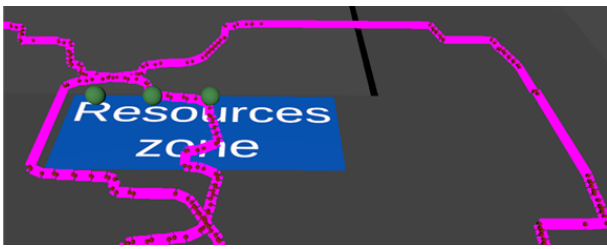


Fig. 12 Visualization of NFP-based collision avoidance path generation

먼저 이동한다. 함재기가 아닌 함교나 resource zone에 충돌 시 새로운 경로를 탐색한다. 이 방식은 시뮬레이션 실행 중 각 이동 명령마다 반복 적용되며, 시간 단위로는 매 이동 프레임 또는 의사결정 단위 시점마다 수행된다.

Fig. 12는 본 연구에서 구현한 NFP 기반 회피 경로 생성 결과의 시각화 예시이다. 그림은 자율 이동 중인 항공기가 자원 구역(resource zone) 근처에 위치한 고정 장애물 및 자원과 자색 폴리곤이 충돌 시 이동 경로를 폐기 후 새로운 이동 경로를 생성한다. 해당 알고리즘은 격납고의 배치 조건(폭, 함재기 배치각)에 관계없이 적용 가능하며, 이후 4.4절과 4.5절에서는 이 알고리즘이 적용된 시뮬레이션 결과를 통해 조건별 회피 빈도, 경로 효율성 등의 성능 차이를 비교·분석할 예정이다.

4. 공간 활용 시뮬레이션 및 결과 분석

4.1 시뮬레이션 환경 구성

본 연구에서 개발한 공간 활용 시뮬레이션 모델을 실행하기 위해, 실제 함정 운용 데이터를 반영한 환경을 구성하였다. 모든 자원의 기본 이동 속도는 1m/s로 설정하였다. 작업 소요 시간은 영국 Babcock사의 퀴 엘리자베스급 항공모함 운용 데이터를 기반으로 설정하였으며, 확률 분포는 작업 특성에 따라 Table 3과 같이 Uniform 분포 또는 Triangular 분포를 적용하였다(Jung et al., 2024). 각 확률 분포는 항공모함 내 실제 임무 수행 시간이 측정된 값을 기반으로 샘플링하여 확률적 상태 변화를 구현하였다. 비행갑판 구역에서는 A-B 두 구역에 각각 STOVL 함재기를 배치하였으며, 격납고는 폭과 함재기 배치 각도를 변수로 설정하여 (26.4m, 33.5m / 30°, 45°, 90°) 민감도 분석이 가능하도록 하였다. 각 운용 자원의 임무 수행 시간은 확률 분포로 구현이 되어 있으며, 다수의 시뮬레이션 시 신뢰구간을 얻을 수 있는 평균값으로 수렴성을 확인할 수 있다. 또한, 모든 시나리오는 동일한 초기 조건에서 5회 반복 수행하여 평균값을 산출함으로써 결과의 신뢰성을 확보하였다.

4.2 비행갑판 공간 활용 최적화 결과

본 절에서는 비행갑판 구역에서의 STOVL 함재기 운용 효율성을 평가하기 위해 A 구역과 B 구역의 이함 및 착함 시나리오를 비교 분석하였다. 이를 통해 공간 배치 차이가 전체 임무 수행 시

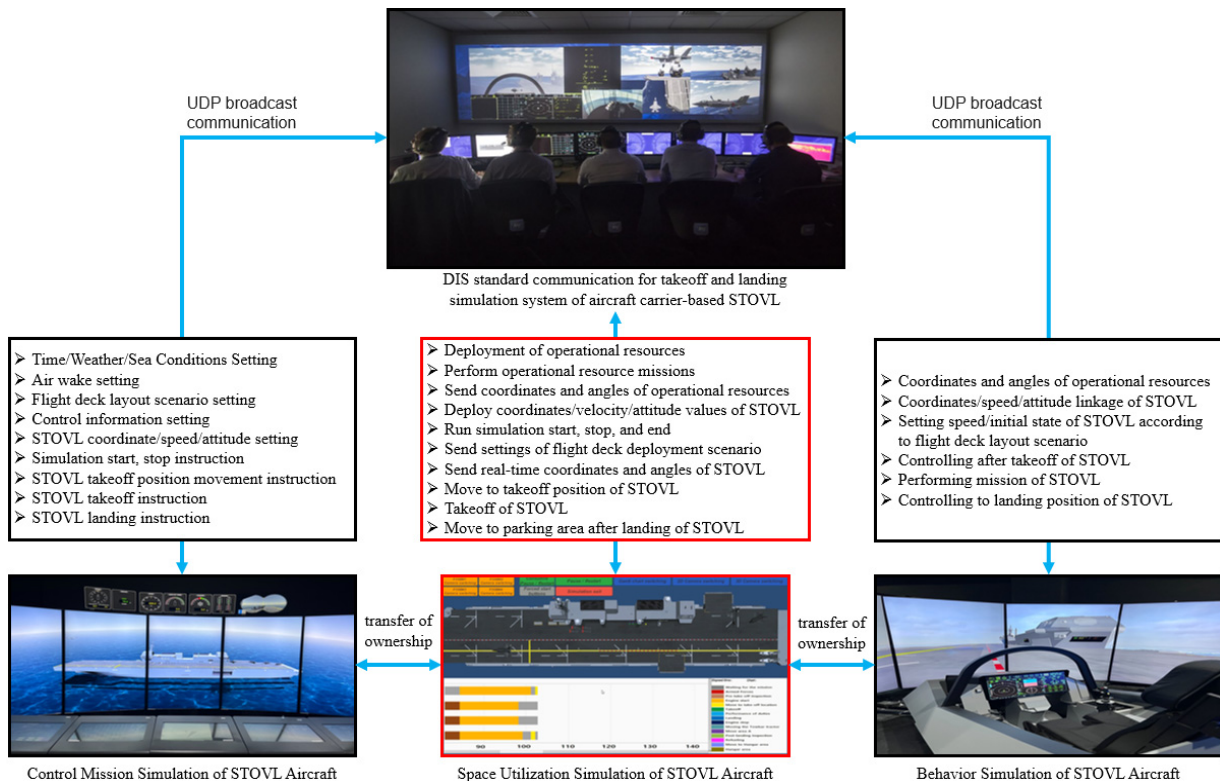


Fig. 13 Integrated simulator linkage using DIS standard communication(Lee et al., 2024)

Table 4 Task performance times from DES trials

Task	Flight deck	
	A area	B area
Weapon loading (Red group)	2,906s	2,654s
Pre-take-off inspection (Brown group)	1,974s	2,112s
Post landing inspection (Green group)	1,010s	1,019s
Refueling (Purple group)	1,775s	1,775s

간과 효율성에 미치는 영향을 규명하였다.

Gantt chart을 활용하여 함정 내 존재하는 수십 개의 운용 자원 좌표 및 각도를 0.02초 간격으로 연동할 수 있으며, 작전 시나리오를 가시적으로 뛰어난 차트(Fig. 14)를 그릴 수 있다. 함재기 1편대(4대)의 운용 자원별 임무 수행 시간을 나타낼 수 있으며, 병목 현상 및 자원 대기 패턴을 확인(Fig. 14)할 수 있다.

(1) 임무 수행 시간 비교

시뮬레이션 결과, 두 구역 간 임무 수행 시간에는 유의한 차이가 나타났다. B 구역은 초기 단계 일부 작업에서 더 빠른 속도를 보였으나, 전체 임무 소요 시간은 A 구역이 더 안정적이고 변동성이 적었다(Table 4). 이는 A 구역의 공간 배치가 항공기 이동 동선과 작업자 접근성을 보다 효율적으로 지원했기 때문이다.

(2) 이함 및 착함 소요 시간

이함 과정에서 A 구역 함재기의 평균 이동 시간은 123.6초, B 구역은 492.7초로, B 구역은 A 구역 대비 약 4배 이상 소요되었다(Table 5). 이러한 결과는 B 구역 항공기가 A 구역 활주로를 공유하기 위해 장거리 이동해야 하는 구조적 제약(Fig. 9)에 기인한다.

착함 과정에서도 A 구역은 144.1초, B 구역은 575.3초로 나타나, B 구역에서 약 4배 더 많은 시간이 소요되었다(Table 6). 이는 착함 후 처리 과정에서 A 구역이 원활한 경로 확보와 장비 접근성을 보유한 반면, B 구역은 협소한 공간 배치로 인해 작업 간 충돌이 발생했기 때문으로 분석된다.

이러한 수치 차이는 단순한 시간 손실을 넘어, 실제 작전 환경에서 임무 순차 지연 및 SGR 저하로 직결될 수 있다는 점에서 중

Table 5 Times to take-off position from flight deck stations

Take-off of STOVL	A area → Take-off spot of A area	B area → Take-off spot of A area
No.1	21.2s	105.5s
No.2	28.2s	112.0s
No.3	32.4s	130.4s
No.4	41.8s	144.9s
Total time	123.6s	492.7s

Table 6 Post-landing taxi times to flight deck stations

Landing of STOVL	Landing spot → A area	Landing spot → B area
No.1	32.7s	123.3s
No.2	29.4s	137.3s
No.3	46.5s	149.2s
No.4	35.5s	165.5s
Total time	144.1s	575.3s

요한 의미를 가진다.

(3) 공간 활용 효율성 지표 분석

Table 4에 따르면, 무장 탑재 작업은 B 구역에서 더 짧게 나타났다, 이륙 전 점검 및 착륙 후 점검에서는 A 구역이 우수한 성과를 보였다. 급유 작업은 두 구역 간 유의미한 차이가 없었다.

이를 종합하여 계산한 평균 처리 시간(Average Handling Time, AHT)은 A 구역이 전반적으로 더 짧게 산출되었다. 즉, 특정 작업에서는 B 구역이 유리하더라도, 전체 흐름을 고려하면 A 구역이 상대적으로 높은 공간 활용 효율성을 보였다.

(4) 운용 효율성 개선 가능성

이러한 결과는 향후 운용 효율성 개선 방안을 마련하는 데 중요한 시사점을 제공한다. 구체적으로, B 구역은 무장 탑재에서 강점을 보였으므로 해당 배치 방식을 다른 절차에도 확대 적용할 수 있다. 반면, 점검 절차의 효율성 저하는 A 구역의 절차 설계와 공간 배치를 참조하여 개선할 수 있다. 나아가 작업 동선 및 장비 배치 최적화, 추가 인력 및 지원 장비 배치, 절차 단순화 및 표준화를 통해 B 구역의 평균 처리 시간을 단축시킬 수 있을 것이다(Fig. 15). 이러한 개선은 B 구역의 성능을 A 구역 수준으로 끌어올려 전체 비행갑판 운용 효율성을 향상시킬 수 있다.

(5) 종합 고찰

종합적으로 본 연구의 결과는 단일 AHT만으로는 공간 활용

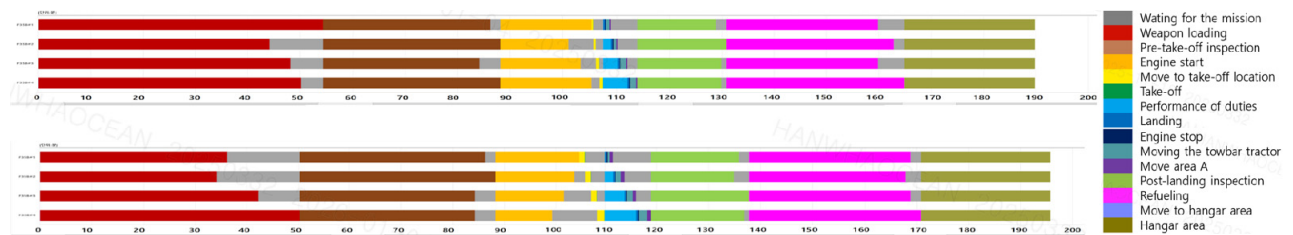


Fig. 14 Flight deck DES task durations shown as a Gantt chart – fourth round of five (Area A: upper, Area B: lower)

효율성을 온전히 설명하기 어렵다는 점을 보여준다. 실제 운용에서는 작업별 세부 성과와 전체 평균 처리 시간을 함께 고려해야 한다. A 구역은 전반적으로 높은 효율성을 보였으나, 일부 작업에서는 B 구역이 우수한 결과를 나타냈다. 이는 항공모함 운용에서 공간 활용 최적화가 단순히 평균 소요 시간을 줄이는 데 그치지 않고, 작업 간 균형적 효율성을 확보하는 것이 핵심임을 시사한다.

따라서 비행갑판 설계 단계에서 구역별 배치 전략을 정교하게 수립하는 것이 전체 SGR 향상에 핵심적임을 확인하였다.

4.3 격납고 공간 활용 최적화 결과

본 절에서는 격납고 폭과 STOL 함재기 배치 각도가 운용 효율성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 격납고는 자원 구구역을 포함하며 폭이 제한적이고, 함재기 밀집도가 높아 배

치 전략과 이동 경로 설계가 전체 작전 효율성에 직접적으로 작용한다.

(1) 제약 조건 분석

격납고 초기 배치는 실제 항공모함 도면을 기반으로 Fig. 15, Fig. 16과 같이 구성하였다. 폭은 26.4m와 33.5m 조건을 적용하였으며, 배치 각도는 30°, 45°, 90°로 구분하였다. 격납고의 초기 폭은 대한민국 독도급 대형수송함의 격납고의 폭을 변형한 값이며, 33.5m의 폭은 다수의 시뮬레이션을 통하여 격납고 내 소티 생성률이 유의미하게 상승하는 구간이다. 또한, 배치 각도에서도 유의미하게 소티 생성률이 상승하는 값을 설정하였다. 시뮬레이션 시뮬레이션에서는 Towbar-less tractor를 사용하여 함재기를 견인하고, 이동 과정에서 Fig. 17과 같이 NFP 기법을 활용하여 충돌 가능성을 실시간으로 검출하였다.

(2) 목표 함재기 이동 소요 시간 비교

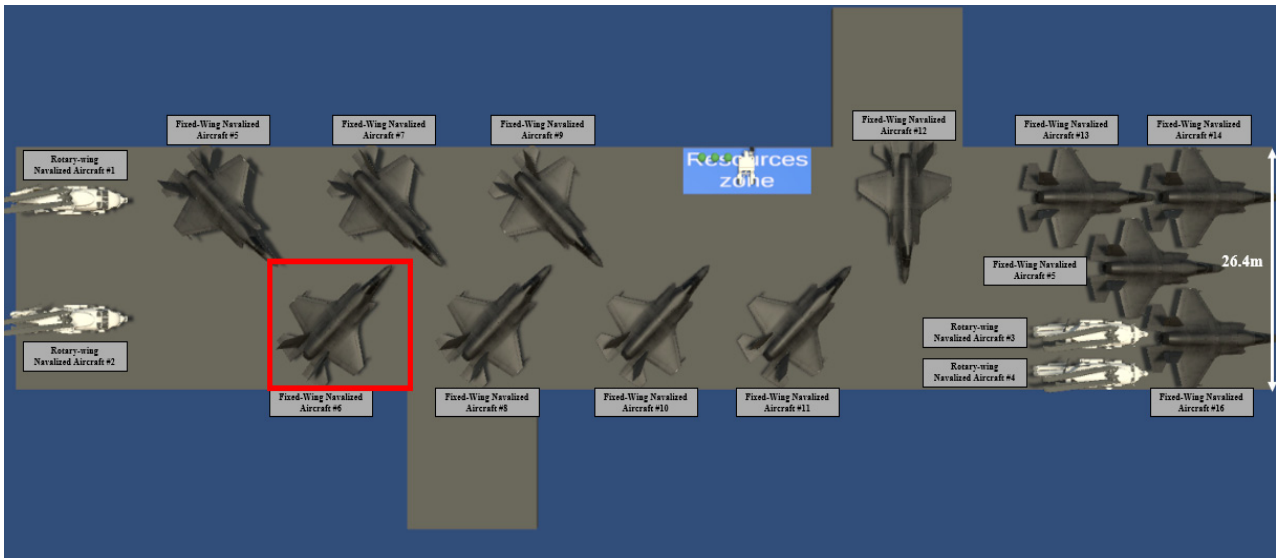


Fig. 15 Hangar layout(26.4m): moving aircraft No. 6 (with 45° orientation) to the flight deck

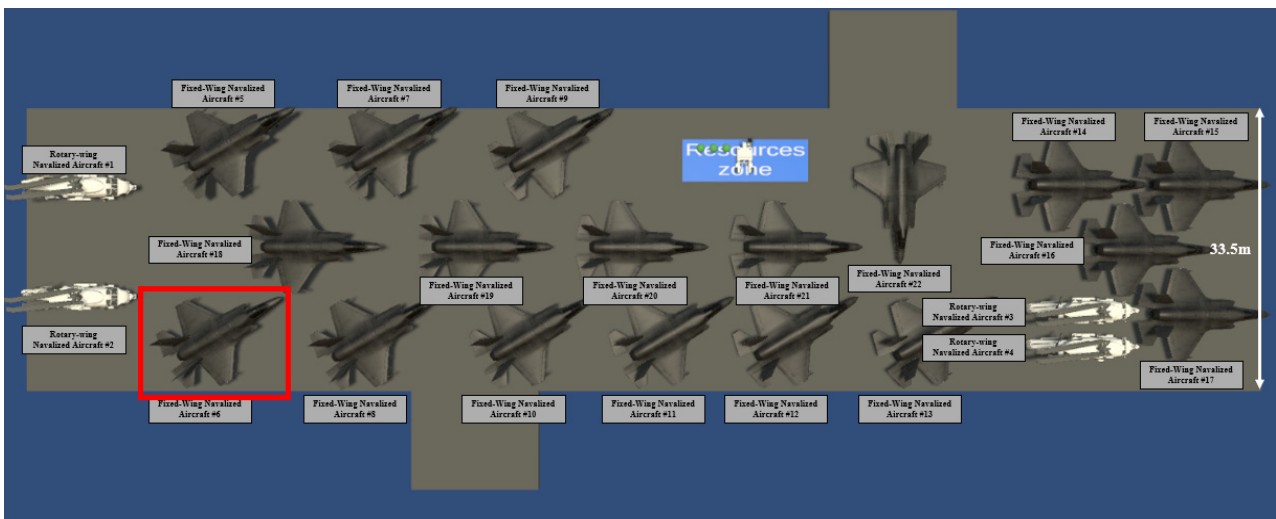


Fig. 16 Hangar layout(33.5m): moving aircraft No. 6(with 30° orientation) to the flight deck

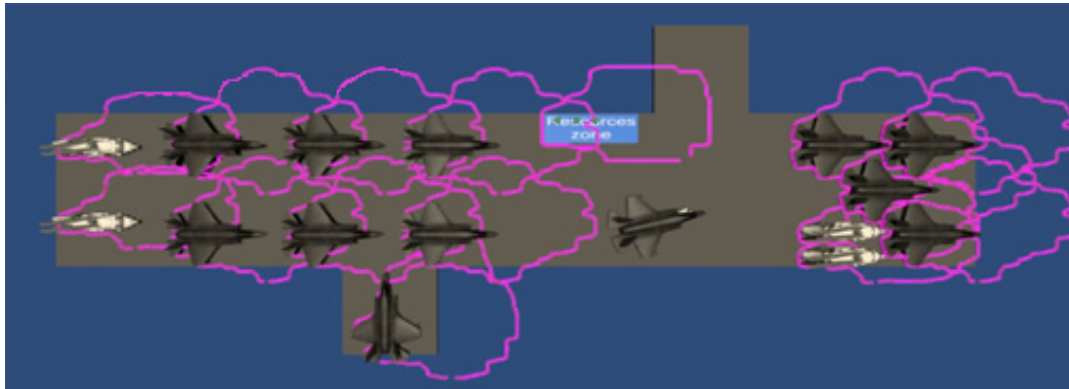


Fig.17 Hangar deck simulation for fixed-wing naval aircraft relocation using NFP collision detection

Table 7 Hangar movement time of STOVL No.6 at 45° Orientation(Hangar width: 26.4m)

Moving STOVL	Angle	Hangar → Flight deck
No.12	45°	69s
No.11		360s
No.10		323s
No. 9		205s
No. 8		516s
No. 7		244s
No. 6		510s
Total time		2,227s

Table 8 Hangar movement time of STOVL No. 6 at 90° Orientation(Hangar width: 26.4m)

Moving STOVL	Angle	Hangar → Flight deck
No.12	90°	224s
No.11		275s
No.10		352s
No. 8		426s
No. 6		524s
Total time		1,801s

격납고 후방에 배치된 목표 함재기(No. 6)를 비행갑판으로 이송하는 시나리오를 통해, 각 조건별 총 소요 시간과 선행 항공기 이동 횟수를 측정하였다. 분석 결과, 26.4m, 45° 배치 조건에서는 평균 7대의 선행 이동이 발생하여 총 소요 시간이 2,227초로 가장 길었다(Table 7). 동일 폭에서 90° 배치 조건은 평균 5대 이동, 총 1,801초로 가장 짧았다(Table 8). 한편, 33.5m, 30° 배치 조건에서는 평균 6대 이동, 총 2,037초가 소요되어 중간 수준을 보였다(Table 9).

(3) 공간 활용 효율성 평가

격납고 폭과 함재기 배치 각도는 배치 가능 함재기 수용력(deployable number)과 AHT에 상충적 영향을 미쳤다. Table 10에 따르면, 폭 33.5m 조건에서는 최대 18대(4편대+2대)의 함재기 배치가 가능하였으나, 폭 26.4m 조건에서는 최대 12대(3편대)

Table 9 Hangar movement time of STOVL No. 6 at 30° Orientation(Hangar width: 33.5m)

Moving STOVL	Angle	Hangar → Flight deck
No.22	30°	79s
No.21		257s
No.20		331s
No.19		399s
No.18		452s
No. 6		519s
Total time		2,037s

Table 10 Deployable number of fixed-wing naval aircraft by hangar width and STOVL angle

Hangar width	STOVL angle	Deployable number
26.4m	30°	12 STOVL (3 Flights)
	45°	
	90°	
33.5m	30°	18 STOVL (4 Flights + 2 STOVL)
	45°	
	90°	17 STOVL (4 Flights + 1 STOVL)

로 제한되었다. 반면 운용 효율성 측면에서는 26.4m, 90° 배치가 가장 짧은 AHT(1,801초)를 보였다. 이는 폭의 확장이 반드시 이동 효율성 향상으로 이어지지 않으며 함재기 배치 각도 및 형상, 함재기 및 격납고의 크기 등 영향 인자들이 주요 결정 요인임을 의미한다.

(4) 종합 고찰

격납고 폭의 확장은 배치 수용력 향상에는 기여하였으나, 이동 효율성 개선에는 제한적이었다. 특히 동일 폭 조건에서도 배치 각도 차이에 따라 충돌 회피 빈도와 이동 간섭 정도가 현저히 달라졌다. 이 중 26.4m, 90° 배치가 가장 높은 효율성을 보였으며, 이는 경로 직선화가 간섭 최소화에 효과적임을 시사한다.

따라서 격납고 설계 단계에서는 폭과 배치 각도를 동시에 고려하는 통합적 최적화가 필요하다. 또한 본 연구에서 적용한 NFP

기본 분석은 설계 의사결정에 활용될 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 함재기 유형별 크기 차이, 정비·무장 장비 배치, 무인함재기 운용 시나리오 등 복합 요소를 반영하여 다차원적 분석을 수행할 예정이다.

4.4 충돌 검사 정확도 및 운영 효율성 분석

본 절에서는 격납고에서 목표 함재기(6번기)를 비행갑판으로 이송하는 시뮬레이션 결과를 바탕으로, NFP 기반 충돌 회피 알고리즘의 성능 영향을 분석하였다. 분석은 폭과 배치 각도 조건을 달리한 세 가지 대표 사례를 대상으로 수행하였으며, 각 결과는 Table 7, 8 및 9의 시뮬레이션 로그를 근거로 하였다.

(1) 분석 조건 및 결과 요약

세 가지 조건에서 수행된 시뮬레이션의 평균 결과는 다음과 같다.

- 조건 A: 폭 26.4m, 배치각 45° → 선행 이동 대수 평균 7대, 총 소요 시간 2,227초(Table 7)
- 조건 B: 폭 26.4m, 배치각 90° → 선행 이동 대수 평균 5대, 총 소요 시간 1,801초(Table 8)
- 조건 C: 폭 33.5m, 배치각 30° → 선행 이동 대수 평균 6대, 총 소요 시간 2,037초(Table 9)

조건 B의 총 소요 시간은 조건 A 대비 19.2% 단축, 조건 C 대비 13.1% 단축되는 것으로 나타났다. 반대로 조건 A는 세 조건 중 가장 긴 시간이 소요되었다.

(2) 결과 해석

폭과 배치 각도의 조합은 NFP 회피 알고리즘의 처리 효율에 직접적인 영향을 미쳤다. 특히, 90° 직각 배치(조건 B)는 기체의 진입·이탈 경로가 직선화되어 회전 구간이 최소화되었으며, 이로 인해 NFP 경계 검사의 통과율이 향상되고, 경로 재계산 빈도가 감소하였다. 결과적으로 총 소요 시간이 가장 짧게 나타났다.

반면 45° 사선 배치(조건 A)는 제한된 폭으로 인해 진입각 불일치와 복잡한 차단 패턴(Blocking Pattern)이 빈번하게 발생하였다. 이로 인해 회피 경로 재계산이 잦아지고, 회전·재정렬 시간이 누적되어 가장 긴 소요 시간이 도출되었다.

30° 배치(조건 C)는 폭이 넓어 충돌 가능성은 다소 완화되었으나, 사선 배치 특성상 조건 A와 유사한 충돌 패턴이 발생하였다. 다만, 폭 확장의 효과로 조건 A보다 소요 시간은 단축되었다.

(3) NFP 기반 회피 판단의 작동 메커니즘

NFP 알고리즘은 기체 및 장애물의 외형을 다각형으로 모델링하여 겹침 여부를 판정하고, 충돌 가능 시 대체 경로를 산출한다. 본 연구에서 확인된 성능 영향 요인은 다음과 같다.

- 경로 직선성 및 회전량: 직각 배치는 회전 구간이 짧아 NFP 판정 통과율이 높음
- 차단 패턴의 복잡성: 사선 배치 시 경계선이 복잡해져 회피 경로 재계산 빈도 증가
- 선행 이동 대수: 초기 경로 확보를 위해 이동해야 하는 기체 수가 많을수록 전처리 시간이 증가

(4) 알고리즘 개선 방향

본 분석 결과를 토대로 다음과 같은 개선안을 제시한다.

- 비용 함수 가중치 조정: 회전량과 정렬 불일치에 대한 패널티를 강화하여 직선 경로 우선 탐색
- 단기 대기 전략 도입: 불필요한 장거리 우회를 줄이기 위해, NFP 경계 근처에서 단기 대기를 허용
- 선행 이동 순서 최적화: 차단 해소 순서를 최소 컷(Cut) 기반으로 재배치하여 전처리 시간 단축
- 검사 빈도 조정: 경미한 경로 변화를 무시하는 히스테리시스(Hysteresis) 기법을 도입하여 과도한 재계산 억제.

(5) 운영 및 설계 권고

동일한 폭 조건에서는 배치 각도의 최적화가 시간 단축에 더 큰 영향을 미쳤으며, 90° 직각 배치가 가장 효율적인 것으로 나타났다. 폭 확대는 충돌 회피 여유를 증가시키지만, 배치 각도가 불리할 경우 이점이 상쇄될 수 있다.

따라서 설계 단계에서 폭 확장과 함께 배치 각도 최적화를 병행하는 것이 바람직하다. 또한, 운영 단계에서는 엘리베이터 및 주요 출입 경로와 평행한 배치를 적용하여 효율성을 높이는 것이 권고된다.

본 연구의 결과는 향후 항공모함 격납고 설계 기준 수립 및 운용 절차 최적화에 정량적 근거를 제공하며, 추가 연구에서는 보다 복잡한 기체 형상 및 다중 경로 환경에서의 검증이 필요하다.

4.5 민감도 분석(Sensitivity analysis)

항공모함 격납고의 공간 활용 최적화를 위한 주요 설계 변수 가운데, STOL 함재기의 배치 각도와 격납고의 폭은 시뮬레이션 결과에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 나타났다. 본 절에서는 이 두 변수의 변화가 총 이동 시간, 선행 항공기 이동 대수, 회피 경로 재계산 횟수에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여, 초기 설계 단계에서의 의사결정에 실질적인 근거를 제공하고자 한다.

(1) STOL 배치 각도의 영향

배치 각도는 항공기 간격, 회전 반경, 진출입 경로의 직선성 등 운용 효율성에 직접적인 영향을 준다. 동일한 격납고 폭(26.4m) 조건에서, 배치 각도를 30°, 45°, 90°로 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다. Table 11은 각 조건에서 측정된 주요 지표의 평균값을 제시한다.

분석 결과, 90° 직각 배치는 45° 대비 총 이동 시간이 약 19% 단축, 회피 경로 재계산 횟수가 33% 감소하였다. 또한 경로 길이 증가율이 절반 이하(-56%)로 줄어들어 가장 효율적인 조건임이 확인되었다. 반면 30° 배치는 항공기 간 간격 확보에는 유리하지만, 회전과 병목 구간이 빈번하게 발생하여 총 이동 시간과 회피 빈도가 모두 증가하였다.

이는 배치 각도가 단순한 배열 미학적 요소가 아니라, 실질적인 공간 활용성과 운용 효율성을 결정하는 전략적 설계 변수임을 보여준다.

(2) 격납고 폭 변화의 영향

격납고 폭은 항공기 간 간섭 여부와 직접적으로 연계된다. 폭은 26.4m(함재기의 2열 배치, Fig. 15)와 탑재 함재기 수 증가를

Table 11 Sensitivity of key indicators to changes in STOVL parking angle (26.4m width case)

Parking angle	Number of aircraft moving ahead	Total moving time	Number of avoidance path recalculations (avg./case)	Path length increase rate (%)
30°	6	2,120s	6	+26.03
45°	6	2,227s	6	+25.03
90°	4	1,801s	4	+11.19

Table 12 Sensitivity of key indicators to changes in hangar deck width (fixed at 45° angle)

Hangar deck width	Number of STOVL moving ahead	Total moving time	Number of avoidance path recalculations (avg./case)	Path length increase rate (%)
26.4m	6	2,227s	6	+25.03
33.5m	6	2,394s	5	+28.09

고려한 최소 폭 33.5m(함재기 3열 배치, Fig. 16)를 기준으로, 동일한 45° 배치 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. Table 12는 주요 성능 지표의 비교 결과를 제시한다.

격납고 폭이 7.1m 확대됨에 따라, 회피 경로 재계산 횟수는 6회에서 5회로 약 17% 감소하였다. 특히 경로 길이 증가율이 28.09%로, 기존 대비 절반 이하 수준으로 줄었으며, 충돌 회피의 빈도와 복잡성이 현저히 완화되었다. 총 이동 시간은 다소 증가하였으나, 이는 기체 간격 확대에 따른 초기 이동 경로 증가 효과로 해석된다.

이 결과는 단순한 공간 수용성 확보뿐만 아니라, 운용 효율성 지표를 반영한 최소 요구 폭 산정이 필요함을 시사한다.

(3) 종합 해석 및 설계 시사점

두 변수에 대한 민감도 분석을 종합하면 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 배치 각도는 회피 알고리즘과 경로 효율성에 가장 큰 영향을 주는 변수로, 직각에 가까울수록 효율이 향상된다.
- 격납고 폭은 일정 수준 이상 확보될 경우, 충돌 위험과 경로 복잡성을 크게 감소시키며, 단기 운용성뿐 아니라 중장기 정비 효율성에도 기여한다.
- 두 변수는 상호작용 관계를 가지므로, 두 변수를 체계적으로 조합해 결과를 비교하는 설계 전략이 필요하다.

따라서 본 연구는 항공모함 격납고 공간 설계 시 단순 면적 확보 차원을 넘어, 운용 시뮬레이션 기반의 성능 최적화 전략을 도입할 필요성을 실증적으로 제시하였다.

5. 결론

본 연구에서는 항공모함의 비행갑판과 격납고의 공간 활용 효율성 극대화를 목적으로, DES를 기반으로 한 정량적 분석을 수

행하였다. 연구는 (1) 시뮬레이션 환경 구성, (2) 비행갑판 운용 효율성, (3) 격납고 공간 활용, (4) 충돌 회피 정확도, (5) 민감도 분석을 통해 체계적으로 진행되었다.

첫째, 비행갑판 분석에서는 AHT와 Gantt chart를 활용하여 병목 현상 및 자원 대기 패턴을 확인하였다. 분석 결과, 초기 배치와 재배치(Re-spotting) 방식이 전체 파급 효과에 큰 영향을 미치며, 적절한 배치 전략은 대기 시간 최소화와 출격을 항상에 직접적으로 기여함을 확인하였다.

둘째, 격납고 분석에서는 폭 26.4m 조건에서도 90° 배치가 가장 짧은 평균 처리 시간을 기록하였으며, 폭 33.5m 조건은 배치 수용력을 크게 증가시켰다. 이는 단순한 공간 확장이 효율성 개선으로 직결되지 않으며, 폭과 배치 각도의 최적 조합이 필요함을 의미한다.

셋째, 충돌 회피 분석에서는 NFP 기반 충돌 판정 기법이 높은 정확도를 보였으며, 이를 통해 불필요한 대기 시간을 줄이고 자원 활용을 최적화할 수 있음을 입증하였다.

넷째, 민감도 분석에서는 배치 각도가 가장 큰 영향을 주는 변수로 확인되었으며, 그다음이 격납고 폭, 견인 속도 순으로 나타났다. 이는 설계 및 운용 단계에서 고려해야 할 우선순위를 제시한다는 점에서 의의가 있다.

종합적으로, 본 연구는 항공모함의 설계 및 운용 최적화를 위한 정량적 근거를 제공한다. 특히, 공간 활용의 핵심은 폭 확장이 아니라 함재기 배치 각도의 정밀한 최적화임을 실증적으로 확인하였다. 향후 연구에서는 UAV와 같은 무인 항공기, 정비 및 무장 장비 배치까지 포함한 다차원적 분석을 수행하여, 실제 설계 지침 및 운용 교리 수립에 기여할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 국방신속획득기술연구원으로부터 연구비를 지원(계약번호:UC200006D) 받아 선박해양플랜트연구소에서 “함재기 이-착함 시뮬레이션 기술”(PGS4280)로 수행된 연구결과입니다.

References

- Cui, B., Tao, X. and Yuan, Y., 2022. *An agent-based approach for aircraft fleet scheduling path planning considering space constraint*. Preprint. DOI: <http://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1866210/v1>.
- Jeffrey S. Johnston, 2009. *A feasibility study of a persistent monitoring system for the flight deck of U.S. Navy Aircraft carriers*. Theses and Dissertations. 2400. Available at : <http://scholar.afit.edu/etd/2400> [Accessed 14 July 2025].
- Jung, S., Yoon, H., Oh, S., Woo, J., Bae, S., Park, D., Lee, W., Lee, J., Lee, H. and Chung, J., 2024. Analysis and calculation of factors influencing the SORTIE generation rate (SGR) of aircraft-carrying naval ships. *Journal of the*

Society of Naval Architects of Korea, 61(4), pp.267-277.

Lee, H.J., Hong, S.Y., Kim, Y.H., Ruy, W.-S., Park, K.P., Kim, S. and Shin, H., 2024. Development and application of carrier-based STOML aircraft take-off and landing simulation system. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 61(5), pp.400-410.

Lee, J.S. and Ruy, W.S., 2024. Enhancement study of space utilization simulation applying the specifications and dynamic characteristics of Korean aircraft carriers and fixed-wing navalized aircraft. *Proceedings of the 2024 Summer Conference of the Society for Computational Design and Engineering*. Jeju, Republic of Korea, 21-23 August 2024.

Oh, S., Yoon, H.C., Lee, H. and Woo, J., 2023. Development of a simulation for calculating the SORTIE generation rate of an aircraft carrier using discrete event simulation. *Proceedings of the Spring Joint Conference of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Jeju, Republic of Korea, 1-3 June 2023.

Ryu, B.H. and Kim, D.J., 2004. A study on the irregular nesting problem using genetic algorithm and no fit polygon methodology. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 18(2), pp.77-82.

Song, J. and Park, K., 2021. Study on the dynamic model for the simulation of shipyard work vehicles. *Proceedings of the 2021 Joint Conference of the Korean Maritime Science and Technology Society*, Incheon, Republic of Korea, 13-14 May 2021.

Su, X.-C., Han, W., Wu, Y., Zhang, Y. and Song, J.-Y., 2018. A robust scheduling optimization method for flight deck operations of aircraft carrier with ternary interval durations. *IEEE Access*, 6, pp.69918-69936.

Yang, J., Yu, M., Peng, Y., Su, H., & Yang, D., 2021. Multi-objective optimization of carrier-based aircraft support personnel configuration. *Chinese Journal of Ship Research*, 16(6), pp.34-44.

Yoo, B.W., Park, K.P. and Oh, J., 2024. Dynamics simulation model for the analysis of aircraft movement characteristics on an aircraft carrier deck. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 16, 100591.

Authorship Contribution Statement

Jae Seong Lee: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Software, Supervision, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing-review & editing. **WonSun Ru:** Conceptualization, Data curation, Funding acquisition, Project administration, Writing-original draft, Writing-review & editing. **Sa Young Hong:** Conceptualization, Funding acquisition. **Wan-Soo Choi:** Project administration, Supervision, Writing-review & editing.

