



함재기탑재 함정의 소티 생성률(Sortie Generation Rate) 영향인자 분석 및 산출 연구

정선아* · 윤희창* · 오승현² · 우종훈² · 배상우³ · 박동기¹ · 이용섭¹ · 이재혁⁴ · 이혁^{1,†} · 정정훈^{1,†}
한국기계연구원 가상공학플랫폼연구본부¹
서울대학교 조선해양공학과²
(前)국방신속획득기술연구원³
(前)한국기계연구원 가상공학플랫폼연구본부⁴

Analysis and Calculation of Factors Influencing the Sortie Generation Rate (SGR) of Aircraft-carrying Naval Ships

Sunah Jung^{1*} · Heechang Yoon^{2*} · Seunghoon Oh² · Jonghoon Woo² · Sangwoo Bae³ · Dongi Park¹ · Woongsub Lee¹ · Jaehyuk Lee⁴ · Hyuk Lee^{1,†} · Junghoon Chung^{1,†}
Virtual Engineering Platform Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University²
(Former)Defense Rapid Acquisition Technology Research Institute³
(Former)Virtual Engineering Platform Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials⁴

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.

The Sortie Generation Rate (SGR) is a critical performance indicator for carrier-based aircraft and is a key factor for the carrier design process. This study aims to analyze the factors that affect SGR and establish a representative Sortie Generation Process (SGP) along with simulation results to calculate SGR for a naval ship equipped to carry aircraft. Detailed SGR factors are identified from the perspectives of the aircraft, aviation personnel, and aircraft carrier during the flight preparation stage, and the SGP is established accordingly. As a representative, Korean Navy's CVX basic design is chosen for detailed analysis. The physical dimension and spots for the deck design with time and probabilistic data of SGP are considered to develop a queueing network model for SGR calculation. To consider the specific probabilistic features, the model was solved with discrete event simulation tools(SimPy and AnyLogic) where the results show great agreement. Such findings on SGR factors and calculation are expected to be incorporated in the future development of SGR calculation algorithms and also present guidelines for proper design of aircraft carrier based on concrete operation concept.

Keywords : Aircraft-carrying Naval Ship(함재기탑재 함정), Sortie Generation Rate(소티 생성률), Queueing Network Model(대기행렬 네트워크 모델), Discrete Event Simulation(이산사건 시뮬레이션)

1. 서론

최근 한반도에서는 해군력을 증강하기 위해 함재기탑재 함정의 도입이 논의되고 있다. 함재기탑재 함정의 성능(기본 성능, 전투 성능, 특수 성능) 중 전투 성능에 해당하는 소티 생성률(Sortie Generation Rate, 'SGR')은 함재기탑재 함정의 임무 수행을 위해 가장 중요한 요소이며, 설계 과정에서 가장 핵심적인 요구 성능 지표이다 (Lee and Park, 2015). 함재기탑재 함정의 SGR은 정해

진 시간 동안 함재기의 출격 가능한 횟수로, 제한된 자원과 환경 하에서 목표로 하는 SGR을 달성하기 위해서는 SGR 산출에 영향을 미치는 인자들을 분석하고 이를 기반으로 함재기탑재 함정을 설계하여야 한다. 미국, 영국 등 함재기탑재 함정을 운용하는 선진 해군 국가들은 지속적인 연구를 통해 SGR 계산 프로그램을 개발하여, 실제 함재기탑재 함정 설계에 활용하고 있다. 하지만, 현재까지 국내에서는 함재기탑재 함정이라는 개념을 도입한 사례가 없으므로 관련 연구가 전무한 상태이다. 국내에서도 자체적으로

개발하려는 함재기탑재 함정의 효율적인 설계를 위해서는 독자적인 SGR 산출 기술 개발이 필수적이다. 이를 위해 ‘함재기탑재 함정 비행갑판 및 플랫폼 설계기술’이라는 응용연구단계의 선도형 핵심기술 프로그램이 2020년도부터 진행 중이다 (DAPA Report, 2021). 본 연구에서는 프로그램을 구성하는 6개 단위 과제 중 ‘소티 생성률 산출 기술’이라는 단위 과제를 통해 얻어진 SGR 영향인자 식별 결과 및 일부 DB뿐만 아니라, 이를 한국형 경항공모함(CVX) 개념설계의 주요 설계변수(크기, 주기 공간, 운용 함재기 수, 승강기 개수, 격납고 크기 등)를 일부 반영하여 해석적인 방법으로 산출한 SGR 결과를 다루고자 한다.

먼저, 주어진 함재기탑재 함정의 정확한 SGR 산출을 위해서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 소티 생성 과정(Sortie Generation Process, ‘SGP’)과 이를 구성하는 영향인자들을 명확히 식별하는 것이 중요하다. SGP란 소티를 달성하기 위한 순환적인 프로세스로 함재기의 착함, 이동 및 주기, 재보급, 정비, 임무 준비, 이함 전 검사, 이함 등의 인자들로 구성되는 과정이다. 이 과정은 일반적으로 이함 전, 아착함, 착함 후, 정비의 4단계로 구분할 수 있다 (Faas, 2003; Bingol, 2016). 이를 구성하는 영향인자들은 이산적인 시간과 확률분포로 정의되는 개별 행위(activity)로 간주될 수 있다. 그 다음, 이러한 일련의 과정을 플랫폼(함재기탑재 함정)의 설계변수와 맞물려 산출적으로 SGR을 산출하는 것이 중요하다.

이를 위해 기존 연구에서는 비교적 단순하고 이상적인 SGP를 활용하여 SGR 산출 및 분석을 수행하였다. Dietz and Jenkins (1997)은 대기행렬 네트워크 모델(Queueing Network Model, ‘QNM’)를 활용하여, 가장 필수적인 SGP 모델 및 변수를 기반으로 해당 플랫폼의 SGR을 산출하였다. 구체적으로는, 서비스 시설 내에서 고객 또는 작업의 도착, 서비스 제공, 및 대기 과정을 분석하기 위해 수학적 모델을 활용하는 QNM을 활용하여, 함재기탑재 함정에 투입된 함재기 수에 따른 SGR 및 기타 영향인자들

의 산출량(Throughput: TH), 대기시간(Response time: RT), WIP(Work in Progress)등을 산출하였다. 이러한 기초적인 연구를 기반으로 관련 알고리즘이 발전되었으며 소프트웨어 도구와 함께 다수의 확장 연구가 수행되었다. Bingol (2016)은 ARENA 소프트웨어를 이용하여 F-35A 운용 분석을 수행하였으며, 이 때 Lockheed Martin사의 자율군수정보시스템(Autonomic Logistics System, ‘ALIS’)의 정보를 포함시켰다. Aykiri (2016)는 F-16 비행대대의 운용을 분석하기 위해 SIMIO 소프트웨어를 이용하여 정비 인력 자원과 정비 소요 시간, 공급 관련 인자들의 영향성을 분석하였다. Sevimli (2016)는 비행 일정에 따른 함재기의 임무 중단 비율, 항공요원 자원 등의 요소에 대한 영향성 분석을 수행하였다. 다만, 기존 연구는 주로 지상 기지의 SGP에 기반하며, 함재기탑재 함정은 이와 달리 공간적 협소성을 가지기에 기존 연구와는 완전히 다른 영향인자 분석(예. 승강기 개수, 주기공간 고려 등) 및 모델링이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 먼저 일반적인 함재기탑재 함정에서의 고정된 함재기 SGR 산출을 위해 기존의 SGP 모델을 확장하여 SGR 영향인자를 상세하게 식별하였고, 명확한 SGP 모델을 정립하였다. 특히, CVX의 운용개념 및 개념설계 조건을 고려하여 식별된 영향인자들의 순서도 및 구성 확률변수와 CVX의 공개된 공간적인 정보를 바탕으로 QNM과 접목하였다. 이를 시뮬레이션을 통해, 주어진 함재기탑재 함정에서의 최대 SGR 뿐만 아니라, 각 영향인자들의 출력 변수들을 구하여 특정 시간 동안 해당 함정이 처리할 수 있는 작업의 양을 계산하였다. 따라서, 본 연구에서는 1. 국내에서는 명확히 식별된 바가 없었던 SGR 영향인자 식별, 2. SGR 영향인자로 구성된 SGP를 시뮬레이션을 활용하여 SGR 산출, 3. 시뮬레이션 결과 분석을 통한 CVX 최대 SGR 분석 내용을 다룬다. 최종적인 결과 지표는 역으로 수요군이 원하는 SGR을 해당 함재기 탑재 함정이 달성할 수 있는지, 혹은 어떠한 수정

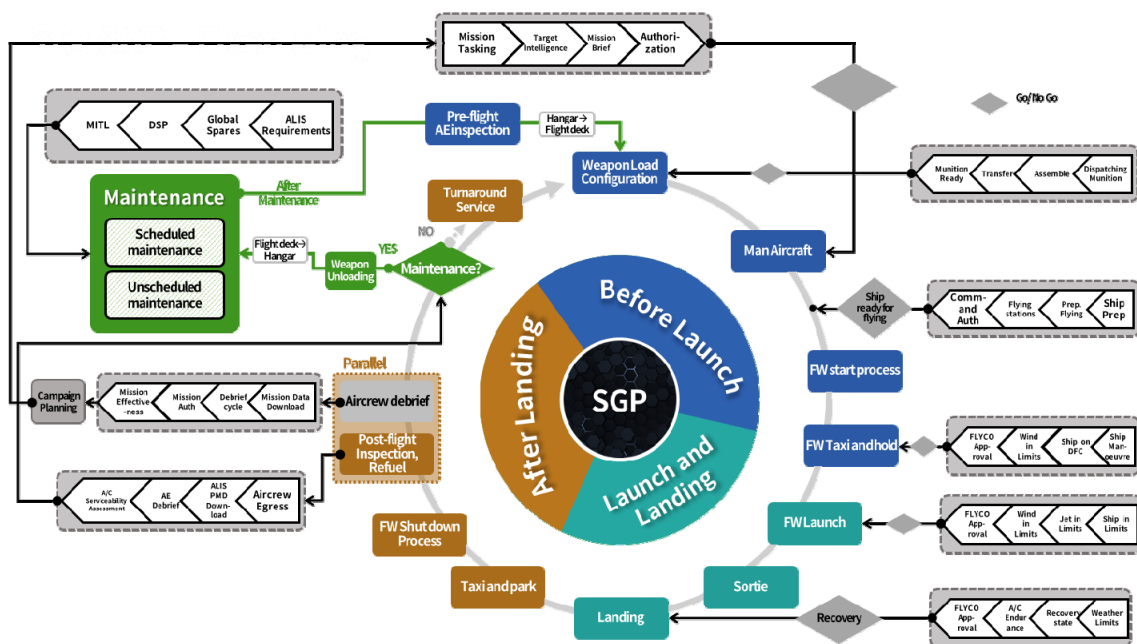


Fig. 1 SGP of fixed wings

사항이 있는지를 알려줄 수 있기에 해당 함정 설계 시 필수적으로 참고해야 할 결과이다.

2. 영향인자 분석 및 SGP 수립

2장에서는 고정익 함재기 탑재 항공모함의 일반적인 SGP 및 구성 영향인자, 그리고 이에 영향을 미치는 기타 요소들에 대해 다룬다. SGP는 크게 이함 전-이착함-착함 후-정비의 4단계로 구분할 수 있다. SGP의 상세 항목은 문헌에 따라 조금씩 상이할 수 있으나 대부분의 경우 유사하게 구성된다. Faas (2003)는 이함 전 단계에서 비행 일정 수립-임무 준비-이함 전 점검으로 설정하고, 이함-이함 후 비행갑판 정리로 수립하였다. 착함 후 단계는 이동 및 주기-함재기 서비스(착함 후 점검 등)-비행 결과 보고로 설정하고, 계획 정비 및 비계획 정비 항목으로 구성하였다. Bingol (2016)은 이함 전 단계에서 무장 탑재-이함 전 점검-엔진 시동 및 최종점검-이동으로 설정하고, 이함-임무-착함의 과정으로 수립하였다. 착함 후 단계는 착함 및 이동-(F-35한정 ALIS 자료 다운로드)-착함 후 점검 및 비행결과 보고로 구성하며, 정비 단계에서는 문제 발생 시 작업, 부품 공급 대기, 계획 정비, 비계획 정비, 창정비 등으로 구성하였다. Aykiri (2016)은 Fass (2003)과 유사하게 이함 전 단계에서 임무 준비-이함 전 점검-이동, 착함 후 단계에서 착함 및 이동-함재기 서비스-비행결과 보고, 정비 단계에서 계획 정비, 비계획 정비 항목으로 수립하였다. 이처럼 여러 문헌에서는 SGP 수립 과정을 유사하게 구성하나 세부 항목 및 순서에 차이가 있다. 본 연구에서는 Faas (2003), Bingol (2016), Aykiri (2016)에서 제시하는 항목들을 토대로 SGP의 주요 항목을 설정하였다. 다만, 기존 연구에서 제시하는 주요 항목 외의 영향인자 식별은 국내 함재기 탑재 함정 및 함재기를 획득·운용한 사례가 없는 만큼 국외 기술보유업체와의 협력이 필요하였고, 이를 위해 영국 해군의 Queen Elizabeth급 항공모함 설계 기술 보유 업체인 영국 Babcock사 제공 정보를 활용하여 상세한 SGP 모델을 정립하였다 (Deller, 2021). 추가적으로, 국내 실정에 맞는 SGP 상세 구성 및 순서와 해당 영향인자의 시간적인 조건들은 소요군 및 조선소와의 기술교류를 통해 확정하였다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 함재기의 SGP에는 주요 항목인 이함 전 점검-무장탑재-항공요원 탑승-엔진 시동-이동 및 대기-이함-임무-착함-이동 및 주기-엔진 정지-착함 후 점검/급유/비행결과 보고-Turnaround 서비스 또는 정비 외에도 많은 요소들이 영향을 미친다. 영향인자는 Fig. 3 및 Table 1에서와 같이 이산적인 시간 또는 시간의 확률 분포로 표현할 수 있으며, 시간으로 나타내기 어려운 운용 개념 항목들은 승인/비승인 과정으로 반영할 수 있다. 현실의 복잡하고 다양한 운용 환경을 시뮬레이션에 모두 반영하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 함재기의 관점에서 SGP를 구성하되, 조종사 및 항공모함의 관점에서도 필요한 필수적인 요소들을 포함하여 설계하였다. Fig.1에서 회색의 항목 및 마름모는 운용 정책과 관련된 항목들로 승인/비승인 과정을 의미하나, 실제 시뮬레이션에서 모든 승인/비승인 항목은 승인된다고 가정한다.

이함 전 과정은 일반적으로 이함 전 점검, 무장 탑재, 조종사의

탑승, 엔진 시동, 이동 및 대기 등의 과정으로 구성된다. 이함 전 점검은 정비를 마친 후 비행갑판으로 이송하기 전에 격납고에서 진행되며, 비행갑판 상에서 Turnaround 서비스를 진행하는 함재기의 경우 생략할 수 있다. 무장 탑재, 조종사 탑승, 엔진 시동은 비행갑판의 지정된 구역에서 진행된다. 급유는 함재기 탑재 함정의 시설에 따라 구역이 달라질 수 있으나, 영국의 OO급 함재기 탑재 함정은 함미, 함수, 주기 구역 모두에서 가능한 것으로 알려져 있다. 무장 탑재는 탄약고에서 무장이 이송하는 과정부터 조립, 비행갑판까지의 이송, 무장 준비를 전제로 하여 승인/비승인 과정으로 반영하였다. 조종사는 이함 전 이함 전 임무를 분석하고 계획하여 승인 받은 후 무장 탑재가 완료되면 함재기에 탑승한다.

함재기, 조종사, 함재기 탑재 함정이 이함을 위한 준비를 마치면, 함재기는 엔진을 시동하고, 함재기 탑재 함정은 이함을 위한 기동을 시작한다. 함재기 탑재 함정은 비행 경로에 조정된 위치로 이동하고, 해양 환경이나 바람이 이함에 적절하지 확인한 후 비행관제소(FLYCO)의 승인을 받는다. FLYCO의 승인이 확인되면 함재기는 활주로로 이동하여 이함을 위해 대기한다. 이후 이함 승인을 받으면 함재기는 이함을 시작하며, 이 때 비행갑판의 운용 구역에 주기된 함재기들은 이함하는 함재기의 Efflux 영향을 고려하여 작업에 유의해야 한다. 함재기가 이함하면 함재기 탑재 함정은 복귀 상황에 대비하여 경로를 조정하고, 전단 내에서 필요한 보호 조치가 이루어지는지 점검하며 복귀를 위한 준비를 수행한다.

임무는 평시 또는 전시 상황에 따라 달라지며, 수행 시간이 상이할 수 있다. 또한, 이함 직전 함재기에 문제가 발생하거나 기상 및 해상 환경으로 인해 임무 중지(mission abort) 상황이 발생할 수 있다 (Harris, 2002). 임무 중지가 발생하는 경우, 편대장 또는 비행대대장의 판단에 따라 편대 구성이 변경될 수 있다. 예를 들어, 함재기 4대로 구성된 1편대의 임무에서 1대가 임무 중지되었을 때, 만약 3대로 임무를 수행할 수 있다면 그대로 진행할 수 있다. 그러나 해당 임무를 수행하기 위해서 4대의 함재기가 반드시 필요한 경우가 있을 수 있는데, 이 경우 비상 대기(alert) 상태에 있던 함재기를 추가하여 총 4대의 함재기로 임무를 진행할 수 있다.

함재기가 착함한 후에는 이동 및 주기, 엔진 정지, 착함 후 점검, 급유, 항공요원의 비행 결과 보고, turnaround 서비스 또는 정비 등을 수행한다. 착함한 함재기는 함미 또는 함수의 주기 구역으로 이동하여 주기한다. 보통은 자체 동력으로 이동하지만, 상황에 따라 엔진을 정지하고 트랙터를 사용하여 이동하는 cold move 방식으로 이동하기도 한다. 그 후 주기된 상태에서 착함 후 점검과 급유를 수행하는데, 이는 비행 결과 보고와 동시에 진행할 수 있으므로 하나의 과정으로 모델링하였다. 만약 함재기의 정비가 필요하지 않은 경우 일정한 시간동안 비행갑판 상에 체류하여 다음 비행을 준비하는데 필요한 작업을 수행해야 한다. 이 시간을 turnaround 시간 또는 turnover 시간이라고 정의하며, 규정된 시간 동안 작업을 해야 다시 출격할 수 있다. 평시와 전시 상황에 따라 turnaround 시간은 달라질 수 있는데, Jewell (1998)은 USS nimitz 간헐적 훈련 시 함재기의 turnaround 시간은 25분에서 57분 정도로 짧다고 제시하였다.

고장정비는 일반적으로 계획 정비(scheduled maintenance)와 비계획 정비(unscheduled maintenance)로 구분된다 (Bingol,

2016). 이는 각각 일반적인 함정의 예방정비(preventive maintenance)와 고장정비(corrective maintenance)와 유사하지만, 본 연구에서 다루는 정비는 함재기에 국한된 정비 개념 (NAVAIR report, 2021)을 다룬다. 계획 정비는 특정 시점에 예정된 정비를 수행하는 것으로, 실제의 경우 함재기 제작사의 계약 정책이나 군의 운용 정책에 따라 적용한다. 비계획 정비는 함재기에서 예상치 못한 시기에 고장이 발생한 경우 수행하는 정비로, 해당 항목은 F-35 함재기에 대해 Lockheed Martin에서 공개하는 고장 간 평균 비행시간 또는 비행시간 당 필요한 정비 공수를 활용하여 가정한다.

본 연구에서는 앞서 기술한 항목들을 기반으로 Fig. 1과 같은 SGP로 구성하여 시뮬레이션에 적용하였다. 시간 요소로 모델링하기 어려운 항목들은 승인/비승인 과정으로 설계하였으나, 실제 시뮬레이션에서는 모두 승인된다고 가정하며, 조종사 및 함재기 탑재 함정의 자원은 충분하다고 가정한다. 즉, 예를 들어 정비를 위한 부품이 충분하여 정비에 자원 요소에 의한 영향은 고려하지 않고 시뮬레이션을 수행하였다.

3. 해석 조건

본 장에서는, 2장에서 개발한 일반적인 고정익 함재기 SGP를 기반으로 SGR을 산출하기 위한 상세 모델링 및 수치 변수 정립에 대해 다룬다.

3.1 CVX 그래프 모델링

명확한 SGR 산출을 위해서는 함재기탑재 함정의 공간적 특성 및 제약 조건을 반영하는 것이 중요하다. 특히 갑판 상에서 한정된 함재기의 주기 위치, 활주로 격납고 개수, 활주로의 이착

함 위치 개수 등은 소티를 발생시키는 데에 큰 제약이 될 수 있다. 이 때문에 갑판 상에서의 함재기 주기 및 이동을 일부 반영하기 위해, Fig. 2와 같이 함재기의 크기를 고려한 주요 위치들을 식별하였다. 그림에서 보는 바와 같이 A 구역은 함수, C 구역은 함미에 해당되며 두 구역 모두 함재기들의 주요 주기 구역으로 임무를 위한 준비 및 착함 후 점검 등 일반적인 행위를 할 수 있는 위치이다. B는 함재기의 이동을 위한 유도로(taxiway)이며, F는 CVX의 지정된 이착함 spot이지만, 본 연구에서는 단거리 이함 고정익 함재기의 여유 공간을 위해 F5, F6에서만 이착함이 가능하다고 가정한다. 중요한 것은 격납고로 이동할 수 있는 승강기의 개수인데, 일반적으로 정비 시 격납고에서 수행되어야 하므로 함재기가 정비 시점이 도달했을 경우 병목현상을 유발할 수 있는 특징이 있다. E 구역은 구조헬기를 위한 공간이며, 본 연구에서는 고정익 함재기의 작전만 다루기 때문에 고려하지 않는다.

3.2 QNM 기반 SGP 모델

본 절에서는, 2장에서 개발한 일반적인 고정익 함재기 SGP를 기반으로 SGR을 산출하기 위한 모델링 및 수치 변수 정립에 대해 다룬다. Fig. 1에서의 상세 모델링은 해석적인 산출을 위해 Fig. 3과 같이 QNM 형태로 수정될 수 있다. 함재기 소티생성 절차를 15개의 단일 대기행렬과 1개의 Fork-Join 대기행렬로 모델링하였다. Fig. 3에서 보듯이 1. 무장 탑재, 2. 항공요원 탑승, 3. 엔진 시동부터 15. 격납고-비행갑판 이동, 16. 비계획 정비까지의 일련의 영향인자 순서를 가진다. 여기서 비계획 정비 단계는 4개의 부대기행렬(sub queueing node)을 갖는 fork-join 대기행렬이고, 나머지 단계들은 단일 대기행렬이다. Table 1에서 보듯이 비계획 정비 단계의 부대기행렬은 각각 서로 다른 시간이 걸릴

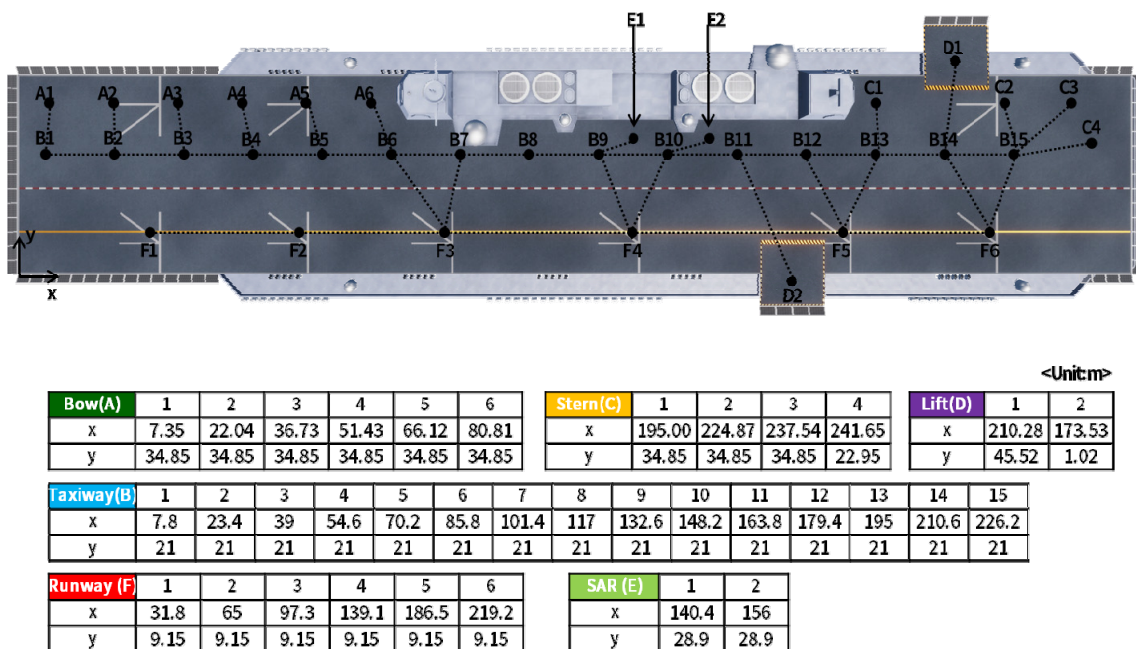


Fig. 2 CVX graph modelling

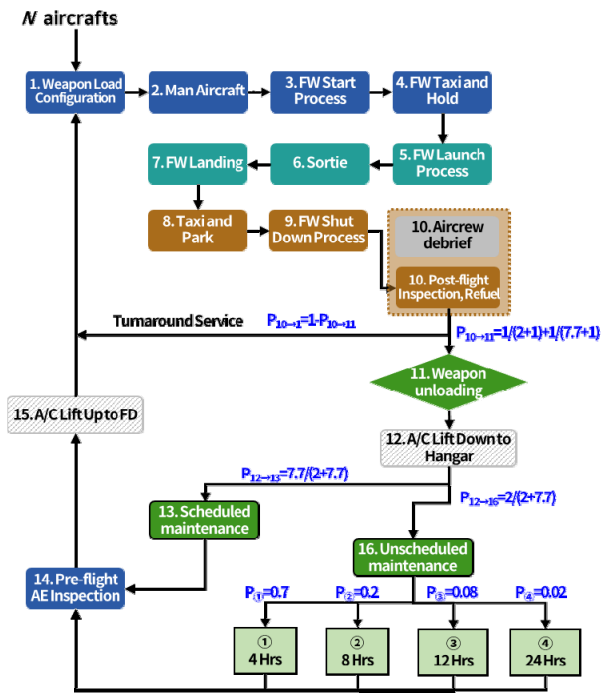


Fig. 3 SGP for simulation

수 있는 개별적인 정비(예. 기체(airframe), 전기/유압 계통, 엔진, 항공전자 계통(avionics) 및 레이더/무장 제어 계통)에 대한 고장 정비 관련 활동들로 간주될 수 있다.

각각의 대기행렬은 Table 1에서와 같이 서비스 시간(대기행렬에서 걸리는 시간을 균일 분포, 삼각 분포 등 확률적으로 표현), 방문빈도(해당 대기행렬로 진행될 확률), resource level(일반적으로 각 대기행렬에서의 서비스 가능 자원의 수, 본 연구에서는 자원은 무한하다고 가정하고 Fig. 2에서 식별한 위치를 제한 조건으로 가정함) 등의 변수를 가지며, 이러한 변수들이 각각 다른 대기시간을 일으키게 된다. Resource level 관련해서 격납고에서의 함재기 주기 공간은 10대, 임무를 하는 공중은 무한대(∞)로 가정하였다.

또한, 각각의 대기행렬들은 다른 대기행렬로 진입할 때 Fig. 2에서와 같이 특정 확률(P)에 의해 지배된다. 해당 모델에서는 소티 수행 이후 정비를 수행하는지의 여부에 따라 함재기가 격납고에 내려갈 수도 있고, 비행갑판에 남아 새로운 임무를 수행할 수도 있다. 본 연구에서는 계획정비는 2소티 당 1회, 비계획정비는 Lockheed Martin사의 정보에 따라 7.7 비행시간 당 1회(즉, 7.7 소티 당 1회)라고 가정하여 Fig. 3과 같이 정비 관련 방문 빈도를 설정하였다. 마찬가지로 비계획 정비에서 4시간 정비를 할 확률이 70%, 24시간 정비를 할 확률이 2%인 셈이다.

기존의 QNM 기반 평균값 분석 방법에서는 식 (1)로 표현되는 'Arrival Theorem' (Lavenberg and Reiser, 1980)과 식 (2)로 주어지는 'Marginal Local Balance Theorem'에 근거하여 모든 대기행렬들에서의 응답시간 및 이에 따른 처리량 등을 계산하였다.

$$PA_i(n|N) = P_i(n|N-1) \tag{1}$$

여기서, $PA_i(n|N)$ 은 전체 고객수 N 개를 갖는 네트워크에서 i 번째 대기행렬에 도착하는 고객이 이미 i 번째 대기행렬에 와있는 고객의 수가 n 인 것을 발견하는 확률이고, $P_i(n|N-1)$ 은 전체 고객수 $N-1$ 개를 갖는 네트워크에서 임의의 고객이 n 명의 고객이 i 번째 대기행렬 있는 것을 보게 되는 확률이다.

$$\mu_i(n)P_i(n|N) = \lambda_i(N)P_i(n-1|N-1) \tag{2}$$

여기서, μ_i 와 λ_i 는 각각 i 번째 대기행렬의 서비스율(service rate)과 처리량을 의미한다.

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 재귀적 연산(recursive calculation)을 수행하면, 각 대기행렬의 응답시간과 처리량 등을 구할 수 있다. 하지만 이러한 QNM 방법의 경우 서비스 시간이 모두 지수분포임을 가정하기 때문에, 지배 방정식이 단순화 된 것이며, 이러한 수식을 통해서 Table 1의 상세 확률분포를 반영한 SGR를 정확히 산출할 수 없다.

따라서, 본 연구에서는 QNM 기반으로 만들어진 SGP 모델을 이산 사건 시뮬레이션으로 다시 모델링하여 해석하여 지수분포가 아닌 다양한 일반적인 분포에 대한 해석을 할 수 있도록 하였다. 한편, 함재기 탑재 함정 시뮬레이션은 비행 계획(정해진 임무 시작 시간이 있는 경우)에 따라 임무를 할당하고, SGP에 따라 임무를 진행해 가는 방식이 일반적이다. 반면, 본 연구에서는 주어진 플랫폼(CVX)에서의 이상적인 최대 SGR를 산출하기 위해 임무는 무한정 존재한다고 가정하고, 임무를 마치고 돌아온 함재기는 곧바로 다음 임무를 할당받는 방식으로 QNM의 원리를 시뮬레이션에 적용하였다.

4. 해석 수행 과정 및 결과

이산 사건 시뮬레이션(DES)은 동적 시스템 모델링의 한 형태로, 시스템의 상태를 유한 개의 이산적인 값으로 나타내는 방법이다. DES는 시스템, 모델, 상태, 개체, 특성, 리스트, 이벤트, 미래 이벤트 리스트(Future Event List, 'FEL'), 액티비티, 지연, 시계와 같은 다양한 요소들의 상호작용을 통해 구성된다. 이러한 상호 작용은 초기화, 최소-시간 이벤트, 확률 변수 생성기 등 여러 단계를 통해 수행된다. 초기화에서는 시뮬레이션의 시작에서 시스템 상태를 초기화하고 시계를 0으로 설정한다. 이후 최소-시간 이벤트 방법은 FEL에서 다가오는 이벤트를 식별하고, 발생한 이벤트에 따라 시스템의 상태와 누적 통계를 업데이트한다. 확률 변수 생성기는 정의된 확률 분포를 통해 샘플링하여 확률적 상태 변화를 구현한다.

이러한 고유한 구성과 메커니즘을 통해 DES는 복잡한 시스템 내에서 발생할 수 있는 다양한 시나리오를 모델링하고 예측할 수 있게 해준다. 특히, 프로세스를 구성하는 단위 작업들의 시작과 끝이 명확한 경우에 DES 모델링이 특히 유용하다. 이는 DES가 미래의 이벤트들을 효과적으로 예측하고, 시스템 내에서의 동적인 상호작용을 정확히 반영할 수 있기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 두 가지 방법의 DES를 활용하여 특정 시스템의 행동을

Table 1 SGP data

Activity	Distribution (Unit: minute)	Visit ratio	Resource Level (Location)	
1. Weapon load configuration (Dietz and Jenkins, 1997)	Uniform(30,60)		A1, A2, A3, A4, A5, A6, C1, C2, C3, C4	
2. Man aircraft	Triangular (25, 30, 45)			
3. FW start process	Triangular (10, 20, 30)			
4. FW taxi and hold	Triangular (3, 5, 10)			
5. FW launch process (Bingol, 2016)	Uniform(2, 7)		F5, F6	
6. Sortie	60		Air(∞)	
7. FW landing	Uniform(2, 3)		F5, F6	
8. Taxi and park	Triangular (5, 8, 10)		A1, A2, A3, A4, A5, A6, C1, C2, C3, C4	
9. FW shut down process	Uniform (15, 20)			
10. Refuel	Triangular (20, 30, 40)			
11. Weapon unloading	Uniform(30, 60)		D1, D2	
12. A/C lift down to hangar	Triangular (25, 30, 50)			
13. Scheduled maintenance	120		Hangar (Capacity:10)	
14. Pre-flight AE inspection (Bingol, 2016)	Triangular(50, 60, 70)			
15. A/C lift up to FD	Triangular (25, 30, 50)		D1, D2	
16. Unscheduled maintenance (Lockheed Martin, 2023)	1	240	0.7	Hangar (Capacity:10)
	2	480	0.2	
	3	720	0.08	
	4	1440	0.02	

모델링하고 분석하였다. 첫 번째로는 Python기반의 오픈소스 시뮬레이션 모듈인 SimPy 라이브러리를 활용한 것이고, 두 번째로는 상용 시뮬레이션 SW인 AnyLogic을 활용한 것이다.

4.1 SimPy 활용 해석

항공모함의 SGR을 시뮬레이션을 이용해 산출하기 위해서는 함재기, SGP, 위치 각각을 객체로 모델링해야 한다. 본 연구에서는 각 객체를 Fig. 4와 같은 구조로 구현하였다. Fighter 객체는 함재기의 이름, 종류와 같은 고유 정보와 현재 위치, 현재 진행중인 과정, 누적 비행 시간, 거쳐야 하는 SGP와 같은 가변한 정보

를 담고 있다. 고유 정보를 참고하여 시뮬레이션을 진행하면서 ‘대기’, ‘SGP 할당’, ‘프로세스 진행 중’ 등의 상태를 반복적으로 거치고, 가변 정보를 업데이트하는 방식으로 정보를 기록한다. SGP의 각 과정에 해당하는 무장 탑재, 항공요원 탑승, 엔진 시동 등의 과정들은 SimPy의 process 기능을 이용하여 구현하였다.

각각의 Process 객체는 ‘가동 중’, ‘비가동 중’의 상태를 반복하며 서비스 시간만큼의 시간의 흐름을 진행시킨다. 시간의 흐름을 진행하는 동안에는 fighter 객체의 상태는 ‘프로세스 진행 중’이 된다.이후 대상 함재기의 SGP 정보를 확인하여 다음 process 객체로 fighter 객체를 전달해준다. 이때, 각 process 객체를 연결하기 위해 SimPy의 resource 중 store 기능을 사용하였다. 마지막으로 본 시뮬레이션의 resource 역할을 하는 위치 객체 또한 SimPy의 store 기능을 이용하여 구현하였다. 이는 함재기가 다음 process로 넘어가기 전에 위치를 옮겨야 할지 확인한 뒤, 옮겨야 한다면 해당하는 위치를 store에서 꺼내고, 원래 위치를 반납하는 방식으로 작동한다. 또한 SGP 시스템은 닫힌 시스템이기 때문에 source와 sink가 하나로 합쳐지게 된다. 이러한 특징을 waiting이라는 객체를 통해 함재기가 소멸하지 않고 계속해서 순환할 수 있도록 구현하였다. Waiting 객체는 ‘대기’ 상태인 Fighter 객체를 ‘SGP 할당’ 상태로 변경시킨 후 SGP의 첫 번째 Process 객체로 Fighter 객체를 전달해준다.

본 시뮬레이션에서는 각각의 시간은 사건이 발생할 때마다 임의로 생성하였으며, 이를 위해 python에서의 numpy 라이브러리를 활용하였다. 따라서 표에 있는 각 데이터들은 numpy 라이브러리에 담고 있는 분포라면 어떤 것이든 대체하여 사용 가능하다. 또한 본 연구에서 설정한 시뮬레이션 시간은 100,000분 기준이며, 이는 SGR의 충분한 수렴성이 확인되는 시간으로 정하였다. 시뮬레이션의 초기 조건으로는 모든 함재기는 격납고에서 출발하는 것으로 하였다.

4.2 AnyLogic 활용 해석

상용 시뮬레이션 SW인 anylogic에서는 SimPy에서와는 다르게, 각각의 객체를 직접 코드 단위로 구현하지 않고 Fig. 5와 Fig. 6과

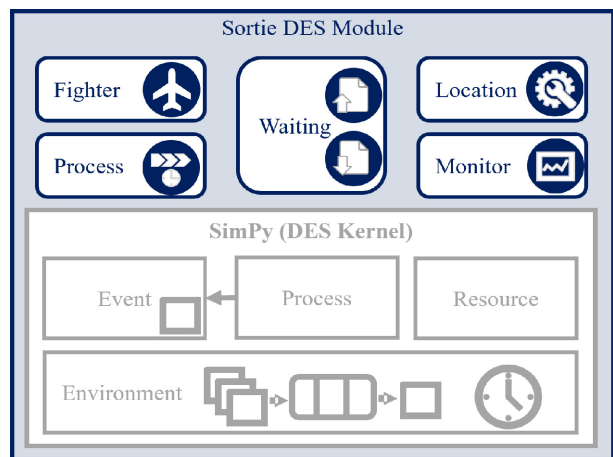


Fig. 4 Sortie DES framework

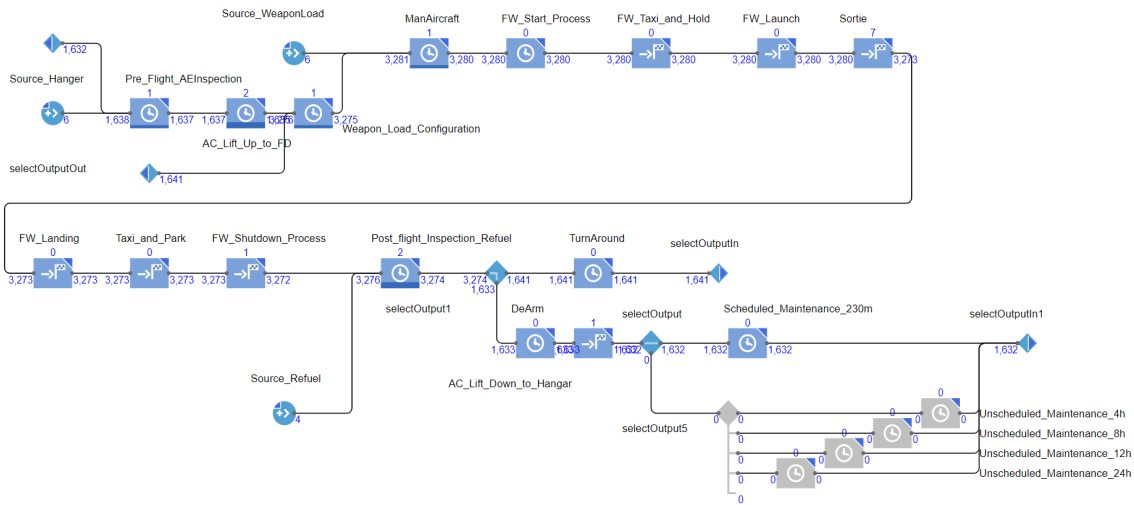


Fig. 5 QNM with AnyLogic

같이 비를 이용해 구현할 수 있다. 각각의 과정들은 시간 지연 모듈, 위치는 자원 풀 모듈을 이용해 구현하여, 위치를 점유하는 시점에 자원풀에서 해당 위치의 자원을 호출하고 위치를 점유 해제할 때, 해당 자원을 다시 반납하는 방식으로 SGP를 구현하였다. 또한 닫힌 시스템인 SGP를 구현하기 위해서 sink에서 함재기 객체가 소멸할 때마다, source에서 같은 특성을 가진 함재기 객체가 생성되는 구조로 시뮬레이션을 구현하였다.

4.3 시뮬레이션 검증

본 절에서는 해석 방법의 유의미함을 제시하기 위해 Dietz and Jenkins (1997)의 결과와 시뮬레이션의 결과를 비교한 결과를 제시한다. Dietz and Jenkins (1997)은 SGP를 Fig. 7와 같이 함재기 소터생성 절차를 5개의 단일 대기행렬과 1개의 fork-Join 대기행렬로 모델링하였다. Fig. 7에서 보듯이 1. Taxi(parking 장소에서 활주로까지의 이동), 2. Sortie(출격), 3. Troubleshoot(고장 진단), 4. Repair(비계획 정비), 5. Turn-Around(재급유 및 계획 정비), 6. Munitions Upload(무장 적재)의 순서를 가지며, repair 단계는 5개의 부대기행렬(sub queueing node)을 갖는 fork-join 대기행렬이고, 나머지 단계들은 단일 대기행렬이다. Table 2에서 보듯이 repair 단계의 부대기행렬은 각각 기체(airframe), 전기/유압 계통, 엔진, 항공전자 계통(avionics) 및 레이더/무장 제어 계통에 대한 비계획 정비 관련 활동들이다.

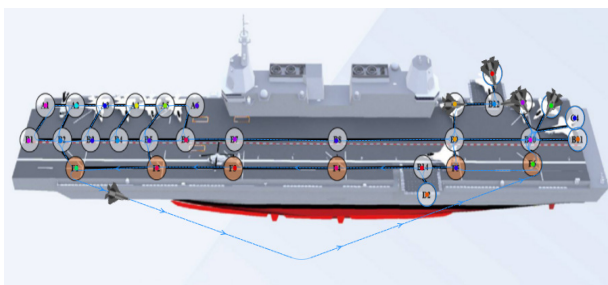


Fig. 6 Graph modelling by AnyLogic

각각의 대기행렬은 Table 2와 같이 service time(서비스를 받는 시간에 대한 지수분포의 평균), repair probability(수리 확률), resource level(각 대기행렬에서의 서비스 가능 자원의 수) 등의 변수를 가지며, 이러한 변수들이 각각 다른 대기시간을 일으키게 된다. 또한, 각각의 대기행렬들은 다른 대기행렬로 진입할 때 식 (3)의 확률 행렬 P 에 따라서 이동하게 되며, P_{ij} 는 대기행렬 i 에서 대기행렬 j 로 전이할 확률이다.

Table 2 SGP Model Parameter (Dietz and Jenkins, 1997)

Activity	Mean service time (hr)	Repair probability	Resource level
Taxi	0.25		∞
Sortie	2.00		∞
Troubleshoot	0.50		∞
Repair 1 (airframe)	2.20	0.17	1
Repair 2 (electrical/hydraulic)	2.27	0.39	3
Repair 3 (engine)	2.37	0.21	2
Repair 4 (avionics)	1.50	0.27	1
Repair 5 (radar/weapon control)	1.19	0.46	2
Turn-Around	0.75		6
Munitions upload	0.50		4

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0.95 & 0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.30 & 0 & 0.70 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

4.4 해석 결과

본 절에서는 SimPy와 AnyLogic으로 산출한 SGR을 비교하고 이에 대한 분석을 수행한다. 두 가지 해석 방안으로 Table 4, 5, 6, 7과 같이 각 과정별로 각 영향인자 결과 값을 산출할 수 있다. 이때 산출량(TH), 응답시간(RT), WIP는 각각 식 (4), (5), (6)와 같이 계산할 수 있다.

$$TH = \frac{N_i}{SIMTIME} \tag{4}$$

$$RT = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} S_{ij}}{N_i} \tag{5}$$

$$WIP = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} S_{ij}}{SIMTIME} \tag{6}$$

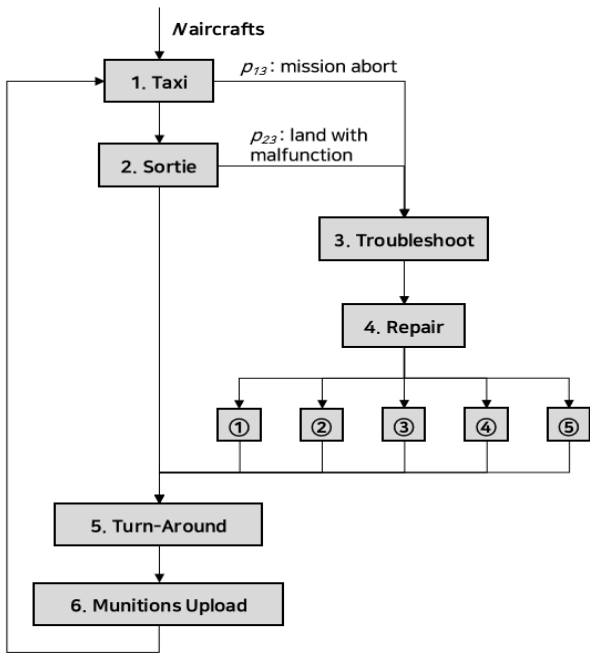


Fig. 7 SGP model (Dietz and Jenkins, 1997)

Table 3과 Fig. 8은 각 해석 방법을 이용한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션과 해석적 방법인 Dietz and Jenkins (1997) 결과 간 오차는 5.4% 이내로, 시뮬레이션 결과와 해석적 방법 간 오차가 유의미하게 작음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 시뮬레이션을 통해 SGP를 적절하게 모델링했고 정확한 SGR 결과를 도출하였음을 보여준다.

Table 3 SGR result(validation model)

Simulation Tool	Number of Aircrafts			
	10	30	50	70
SimPy [EA/day]	52.80	132.24	158.64	164.88
AnyLogic [EA/day]	53.23	135.56	166.23	166.96
Dietz & Jenkins(1997) [EA/day]	52.46	139.10	166.82	173.78

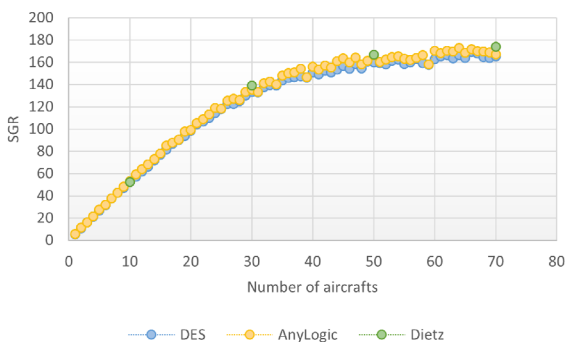


Fig. 8 SGR result(validation model)

Table 4 Results of N=10

Activity	SimPy			AnyLogic		
	TH (EA/day)	RT (min)	WIP (EA)	TH (EA/day)	RT (min)	WIP (EA)
1. Weapon load configuration	43.08	45.19	1.35	42.29	44.36	1.30
2. Man aircraft	43.23	33.26	1.00	42.29	32.54	0.96
3. FW start process	43.20	19.84	0.18	42.28	19.42	0.57
4. FW taxi and hold	43.20	6.00	0.18	42.25	5.87	0.17
5. FW launch process	43.20	2.00	0.06	42.25	2.00	0.06
6. Sortie	43.20	61.04	1.83	42.22	59.66	1.75
7. FW landing	43.20	0.75	0.02	42.22	0.73	0.02
8. Taxi and park	43.20	7.66	0.23	42.22	7.49	0.22
9. FW shut down process	43.20	17.46	0.52	42.22	17.06	0.50
10. Refuel	43.19	30.06	0.90	42.21	29.38	0.86
11. Weapon unloading	19.43	5.00	0.07	19.38	5.00	0.07
12. A/C lift down to hangar	19.43	1.00	0.01	19.38	1.00	0.01
13. Scheduled maintenance	15.51	120.00	1.29	15.06	120.00	1.26
14. Pre-flight AE inspection	19.38	60.07	0.81	19.48	60.39	0.82
15. A/C lift up to FD	19.38	1.00	0.01	19.48	1.01	0.01
16. Un-scheduled maintenance	Total	3.90	329.45	0.89	4.28	361.28
	120min	5.49	240.00	0.91	2.88	240.00
	480min	1.66	480.00	0.55	0.92	480.00
	720min	0.66	720.00	0.33	0.37	720.00
	1440min	0.17	1440.0	0.17	0.10	1440.0

여기서 N_i 는 i 번째 과정을 지나간 함재기들의 숫자를 의미하고, s_{ij} 는 i 번째 과정의 j 번째 함재기가 해당 과정을 처리하는 데 걸린 시간을 의미한다.

이 중에서 6. Sortie(임무)에 해당하는 ‘산출량(TH)’이 바로 단위 시간당 소티 수인 SGR이 된다. 또한 각각의 결과 값들은 Little의 법칙에 의해 식 (7)을 만족하게 된다.

$$WIP = TH \times RT \tag{7}$$

이처럼 선입선출(FIFO: First-In-First-Out) 조건에서 해석을 한 결과는 해당 플랫폼(함재기탑재 함정)에서의 최상의 조건을 가정하기 때문에 ‘최대’ SGR을 알려줄 수 있다. 예를 들어, CVX의 투입 함재기 수가 20대일 때, 함재기당 하루에 약 4.1(SimPy: 81.9/20, AnyLogic: 81.25/20) 소티가 최대라는 결과를 얻게 된다. 추가적

Table 5 Results of N=30

Activity	SimPy			AnyLogic			
	TH (EA/day)	RT (min)	WIP (EA)	TH (EA/day)	RT (min)	WIP (EA)	
1. Weapon load configuration	88.8	45.03	2.78	88.92	45.09	2.78	
2. Man aircraft	89.19	33.27	2.06	88.88	33.15	2.05	
3. FW start process	89.15	19.95	1.24	88.88	19.89	1.23	
4. FW taxi and hold	89.15	5.96	0.37	88.88	5.94	0.37	
5. FW launch process	89.15	2.00	0.12	88.88	2.00	0.12	
6. Sortie	89.06	63.36	3.92	88.80	63.18	3.90	
7. FW landing	88.96	103.36	6.39	88.80	103.18	6.36	
8. Taxi and park	88.96	7.67	0.47	88.75	7.65	0.47	
9. FW shut down process	88.95	17.53	1.08	88.73	17.49	1.08	
10. Refuel	88.93	29.98	1.85	88.69	29.90	1.84	
11. Weapon unloading	39.92	5.00	0.14	40.02	5.00	0.14	
12. A/C lift down to hangar	39.92	1.00	0.03	40.02	1.00	0.03	
13. Scheduled maintenance	31.94	120.00	2.66	32.31	120.00	2.69	
14. Pre-flight AE inspection	39.86	60.05	1.66	40.31	60.72	1.70	
15. A/C lift up to FD	40.1	95.52	2.66	40.31	96.01	2.69	
16. Un-scheduled maintenance	Total	7.96	355.88	1.97	7.59	339.28	1.79
	120min	5.49	240.00	0.91	5.53	240.00	0.92
	480min	1.66	480.00	0.55	1.34	480.00	0.45
	720min	0.66	720.00	0.33	0.62	720.00	0.31
	1440min	0.17	1440.0	0.17	0.10	1440.0	0.10

Table 6 Results of N=70

Activity	SimPy			AnyLogic			
	TH (EA/day)	RT (min)	WIP (EA)	TH (EA/day)	RT (min)	WIP (EA)	
1. Weapon load configuration	88.52	45.14	2.77	88.92	45.34	2.80	
2. Man aircraft	89.52	33.28	2.07	88.88	33.04	2.04	
3. FW start process	89.5	20.03	1.24	88.88	19.89	1.23	
4. FW taxi and hold	89.48	6.00	0.37	88.88	5.96	0.37	
5. FW launch process	89.48	2.00	0.12	88.88	2.00	0.12	
6. Sortie	89.42	64.63	4.01	88.80	64.19	3.96	
7. FW landing	89.01	548.95	33.93	88.80	547.68	33.78	
8. Taxi and park	88.99	7.66	0.47	88.75	7.64	0.47	
9. FW shut down process	88.95	17.52	1.08	88.73	17.48	1.08	
10. Refuel	88.91	29.91	1.85	88.69	29.84	1.84	
11. Weapon unloading	39.27	5.00	0.14	40.02	5.00	0.14	
12. A/C lift down to hangar	39.27	1.00	0.03	40.02	1.00	0.03	
13. Scheduled maintenance	30.66	120.00	2.55	32.31	120.00	2.69	
14. Pre-flight AE inspection	39.17	60.15	1.64	40.31	61.89	1.73	
15. A/C lift up to FD	39.76	534.36	14.75	40.31	541.69	15.16	
16. Un-scheduled maintenance	Total	8.52	349.86	2.07	7.59	311.62	1.64
	120min	6.05	240.00	1.01	5.53	240.00	0.92
	480min	1.58	480.00	0.53	1.34	480.00	0.45
	720min	0.73	720.00	0.37	0.62	720.00	0.31
	1440min	0.03	1440.0	0.03	0.10	1440.0	0.10

Table 7 SGR result

Simulation tool	Number of aircrafts						
	5	10	15	20	30	50	70
SimPy [EA/day]	21.60	42.54	63.36	81.9	88.98	89.31	89.42
AnyLogic [EA/day]	21.72	42.45	63.75	81.25	88.98	89.11	89.24

으로 여러 투입 함재기 수에 따른 SGR 및 함재기당 SGR 결과를 각각 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었다. 투입 함재기 수가 상대적으로 적을 때는 투입량에 따라 SGR이 비례해서 증가하지만, 제한된 resource level(본 연구에서는 공간)에 따라 임계점이 존재하게 된다. 따라서, 일정 투입량(약 25대) 이상 투입 시 SGR은 해당 함재기탑재 함정의 최댓값에 수렴하게 되어 더 이상 투입을

해도 더 큰 SGR을 얻지 못한다. 이는 간접적으로 Fig. 10에 보이듯이, 오히려 함재기당 소티 수는 투입량에 비례해서 감소한다는 것을 의미한다.

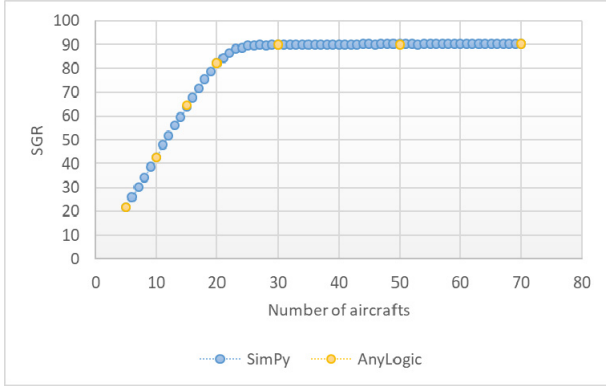


Fig. 9 SGR result

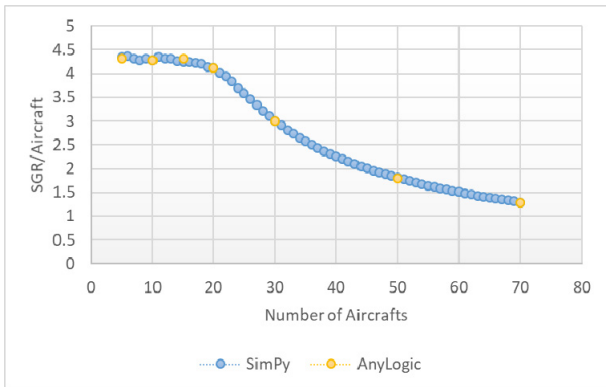


Fig. 10 SGR per Aircraft result

5. 결론

본 연구에서는 함재기탑재 함정의 핵심 성능지표인 SGR을 산출하기 위해 SGP의 기본 개념을 이해하여 SGR 영향인자를 분석하고 시뮬레이션에 적용할 SGP를 수립하였다. 함재기, 조종사, 함재기탑재 함정의 관점에서 SGR에 영향을 미치는 항목들을 식별하여 시뮬레이션에 반영할 수 있는 항목들을 설정하였다. 함재기탑재 함정의 운용개념과 설계 조건을 고려하여 식별된 영향인자들의 순서도(SGP)를 구성하고 확률 변수 및 공개된 공간 정보를 기반으로 QNM 모델링 및 산출 시뮬레이션을 구현하였다. 분석 SW는 오픈 소스인 SimPy를 기반으로 개발한 알고리즘과 상용 SW인 AnyLogic을 활용하였으며, 주어진 함재기탑재 함정의 제원 상에서 투입 함재기 수에 따른 SGR을 분석하였다. 함재기를 약 25대 이상 투입하더라도 해당 함재기 탑재 함정의 제약 상 SGR 최댓값에 수렴하며, 더 증가하지 않는 양상을 보인다. 이처럼 QNM을 이용한 SGR 산출은 주어진 제원과 함재기 수, SGP 조건 하에서 도출할 수 있는 최대 SGR을 확인할 수 있으며, 이는 함재

기탑재 함정의 설계 단계에서 중요한 설계 지표로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 국방신속획득기술연구원 선도형 핵심기술 과제(과제명: 소티 생성률 산출 기술, 계약번호: UC20003D)와 한국기계연구원 기본사업(과제명: 차세대 특수선박의 전주기 안전 강화를 위한 디지털 전환 핵심 기술, NK250B)의 재정적 지원을 받았으며, 지원에 감사를 드립니다.

References

- Aykiri, B., 2016. *Simulation of modeling sortie generation process in TURAF*. Master's thesis. Air Force Institute of Technology Wright-Patterson Air Force Base.
- Bingol, G., 2016. *Simulation of aircraft sortie generation under an autonomic logistics system*. Master's thesis, Air Force Institute of Technology Wright-Patterson Air Force Base.
- DAPA(Defense Acquisition Program Administration) Report, 2021. '21-'35 Core Technology Plan. Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement.
- Deller, M., Berg, K., Hale, A., Hall, J., Jewell, A., Jones, W., Kirk, K., Lynn, L., Matheny, A., Measell, B., Roberts, T. and Wigge, M., 2021. *Sortie generation process model*. Babcock International, P0110-RPT-007-03.
- Dietz, D. and Jenkins, R., 1997. *Analysis of aircraft sortie generation with the use of a fork-join queueing network model*. Naval Research Logistics, 44(2), pp.153-164.
- Faas, P., 2003. *Simulation of autonomic logistics system (ALS) sortie generation*. Master's thesis. Air Force Institute of Technology Wright-Patterson Air Force Base.
- Harris, J., 2002. The sortie generation rate model. *Proceedings of the Winter Simulation Conference IEEE*, 1, pp.864-868.
- Jewell, A., Wigge, M., Gagnon, C., Lynn, L., Kirk, K., Berg, K., Roberts, T., Hale, A., Jones, W., Matheny, A., Hall, J. and Measell, B., 1998. *USS Nimitz and carrier airwing nine surge demonstration*. Center for Naval Analyses Alexandria VA, CRM 97-111.10.
- Lee, S.D. and Park, P., 2015. The study of aircraft carrier sortie generation system (CVSGS) boundary analysis. *Journal of the Korean Society of Systems Engineering*, 11(1), pp.73-79.
- Lockheed Martin, 2023. Fast facts about F-35. March.
- Sevimli, A., 2016. *Sortie generation simulation of a fighter*

squadron. Master's thesis. Air Force Institute of Technology
Wright-Patterson Air Force Base.

US Department of Defense, 2004. CVN 21 Program Next
Generation Aircraft Carrier.

NAVAIR (Naval Air Systems Command) Report, 2021. The
Naval Aviation Maintenance Program (NAMP).

