



함재기 이·착함 시뮬레이션 시스템 개발 및 활용

이한진^{1,†}·홍사영¹·김용환²·유원선³·박광필³·김승균⁴·신현욱⁵
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소¹
(주)세이프텍리서치²
충남대학교 자율운항시스템공학과³
충남대학교 항공우주공학과⁴
(주)케이씨이아이⁵

Development and Application of Carrier-Based STOVL Aircraft Take-Off and Landing Simulation System

Han Jin Lee^{1,†}·Sa Young Hong¹·Yong Hwan Kim²·Won-Sun Ruy³·Kwang Phil Park³·Seungkeun Kim⁴·Hyunwook Shin⁵
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering¹
SafeTechResearch Co., Ltd.²
Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University³
Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University⁴
KCEI Co., Ltd.⁵

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 Republic of Korea Navy is reviewing the development of a ship capable of operating STOVL (Short Take-Off and Vertical Landing) aircraft. However, the Navy has no experience in operating or building such ships, so engineering means are needed to review the design and confirm the operating concept at the concept and basic design stages. In this paper, the authors introduce the results of developing a STOVL aircraft take-off and landing simulation system that reflects the ship's seaworthiness characteristics and major design dimensions based on engineering-based modeling and simulation technology in response to the Navy's needs. The simulation system was developed in which the engineering characteristics of the ship were estimated based on the basic design, and the motion characteristics of the aircraft were implemented by developing equations of motion for a general STOVL. The system was developed to simulate naval aircraft's take-off and landing process and deck movement situation and to confirm the ship operation scenario. By using this simulation system, the Navy will be able to examine not only the ship's structural characteristics at the basic design stage but also the basic conditions for special operational requirements such as take-off and landing.

Keywords : Carrier-based aircraft(함재기), Engineering based simulation(공학 기반 시뮬레이션), Take-off and landing(이착함)

1. 서론

본 연구에서는 경항모를 설계할 때 함재기의 이·착함 과정을 사전에 시뮬레이션하여 함의 운용 개념이 어떻게 구현되는지 시 각적으로 공유하고 이를 바탕으로 경항모 관련 군과 설계팀 사이의 이해를 도모하는 것을 목표로 하였다.

대한민국 해군은 항모에 대한 운용 경험이 없고 관련 기술들은 선진국에서도 외부 공유가 제한되거나 비공개인 상황이다. 따라서 설계 대상 항모의 내항 운동을 정밀하게 추정하고 함재기 이

착함 과정에서 함의 설계 요소들이 함재기 운용 조건에 어떤 영향을 미치는지 검토하기 위해서는 설계에서 경험적 요소를 대체할 수 있는 공학적 접근법이 필요하다. 함재기와 함의 운동을 연계한 공학 기반 시뮬레이션을 이용하여 다양한 운용 조건들을 검토하는 것은 건조 및 운용 경험이 없는 함모의 초기 설계 과정에서 일어날 수 있는 오류를 최소화하고 군의 요구 조건들을 설계 단계에서부터 명확하게 확인할 수 있게 한다. 이와 같은 소위 M&S 기반 설계 프레임워크는 미 해군에서 90년대 중반부터 설계 전 과정의 전산화와 더불어 신개념 함정 개발에 일관성 있게 실

행하고 있는 방법이다 (Jons et al., 1994).

경항모에서 이루어지는 함재기의 이·착함 과정을 시뮬레이션 하기 위해서는 함재기의 운동과 함의 운동 그리고 갑판 위에서의 트랙터 견인 이동 등을 모의할 수 있어야 한다.

함재기의 운동을 모의하는 대표적인 시스템으로는 함재기 조종 훈련용 시뮬레이터가 있다. 조종 훈련용 시뮬레이터는 대상 함재기의 운동을 실제와 최대한 동일하게 모의하여 조종사를 훈련하는 것이 목표이며 이와 같은 성능은 대상 함재기의 상세 설계 자료를 보유한 기관에서만 구현이 가능하다. 그러나 본 연구와 같이 조종 훈련이 아니라 설계에 대한 사전 검토를 수행하기 위한 시뮬레이션 시범체계에서는 정성적인 수준의 운동 묘사만으로도 의도한 목표를 달성할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 경항모 탑재 항공기로 적합한 STOVL(Short Take-Off and Vertical Landing) 함재기의 정성적인 특징을 나타낼 수 있는 운동모델을 개발하여 함재기 운동을 시뮬레이션했다 (Lee et al., 2022).

함 운동 시뮬레이션의 경우에는 함재기와 다르게 접근했다. 함의 설계를 지원하는 것이 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 시범체계의 목표이므로 함 운동에 대해서는 설계 선형을 대상으로 상세 운동 계산을 수행하였다. 함재기 운용을 위해서는 함의 내항 성능 확보가 핵심 요구 사항이므로 내항 성능 관련 모형 시험, 수치 해석 등을 수행하고 이를 바탕으로 실시간 시뮬레이션이 가능한 시범체계를 개발하였다 (Hong et al., 2024; Park et al., 2024).

함재기 운용 시나리오를 공학 기반 시뮬레이션으로 구현하기 위해서는 갑판 위 함재기 견인 이동을 실시간으로 모의하는 것도 중요한 고려 대상이다. 본 연구에서는 다물체 동역학 기반으로 갑판에서 함재기 견인 시 사용하는 Towbar가 있는 트랙터 모델을 개발하였다. 또한 견인 이동 경로 결정 및 충돌 회피 알고리즘을 도입하였으며 함 운동으로 인한 갑판의 움직임이 시뮬레이션에 반영되도록 하였다 (Oh et al., 2023; Yoo et al., 2024).

2. 운동모델

2.1 함재기 운동모델

함재기 이·착함 시뮬레이션을 구현하기 위해서는 함재기의 수학적 운동모델이 필요하다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 함재기는 미군의 F-35B와 같은 STOVL 함재기이다. 서론에서 언급한 바와 같이 함재기에 대한 정확한 운동모델은 함재기 제작사가 보유하고 있으며 대외적으로 공유되지 않는 정보이다. 다만 본 연구에서는 함재기의 조종 훈련이 아니라 이·착함 절차를 검토하는 것이 목적이므로 정성적으로 유사한 운동을 하는 모델을 개발하였다 (Lee et al., 2022).

STOVL 운동모델은 비선형 6자유도 방정식이다. 일반적인 항공기 운동 방정식과의 차이점은 비행 모드에 따라 공력 및 추력 적용 방식이 다르다는 점이다. 이항 시에는 STOVL 모드, 일반 비행 시에는 CTOL(Conventional Take-Off and Landing) 모드, 착함 시에는 다시 STOVL 모드로 작동한다. 또한 각 모드 사이에는

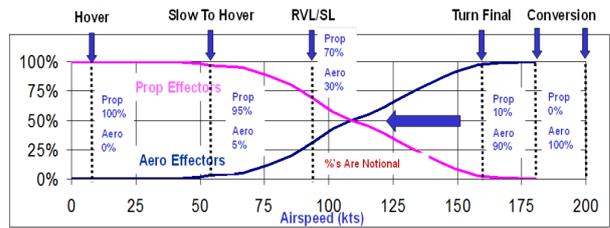


Fig. 1 Graph of aerodynamic force and thrust according to STOVL airspeed (Walker et al., 2013)

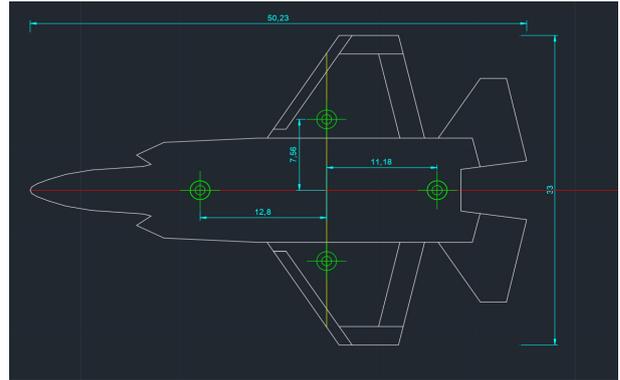


Fig. 2 STOVL estimated thrust positions (green circles)

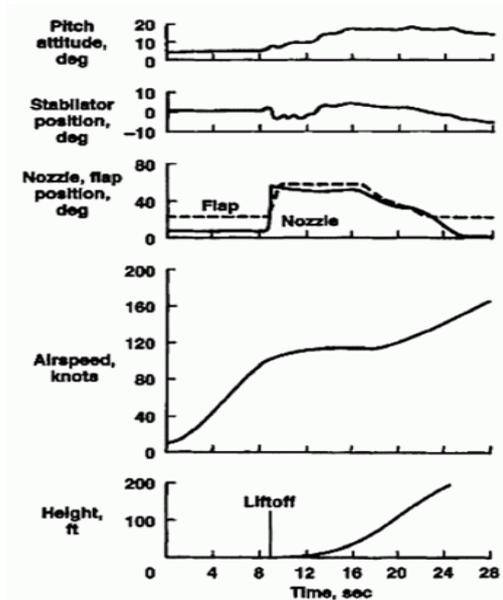


Fig. 3 Time history of Harrier short take-off (Franklin, 2002)

Fig. 1과 같은 변환 과정이 존재한다 (Walker et al. 2013). 추진기 추력과 양력에 의한 부양이 모드에 따라 조정되며 그 과정을 연계하기 위한 제어가 필요하다.

본 논문에서 고려한 함재기에는 STOVL 모드에서 네 개의 추력 발생 위치가 존재한다. Fig. 2는 F-35B 사진 자료를 바탕으로 본 연구에서 추정된 추력 발생 위치이다. 그림에서 녹색 원으로 표시된 부분이 추력이 발생하는 위치들이다. 그림을 보면 일반적인 고정익 함재기와 달리 조종석 쪽과 좌우 날개 쪽에도 추력 발생

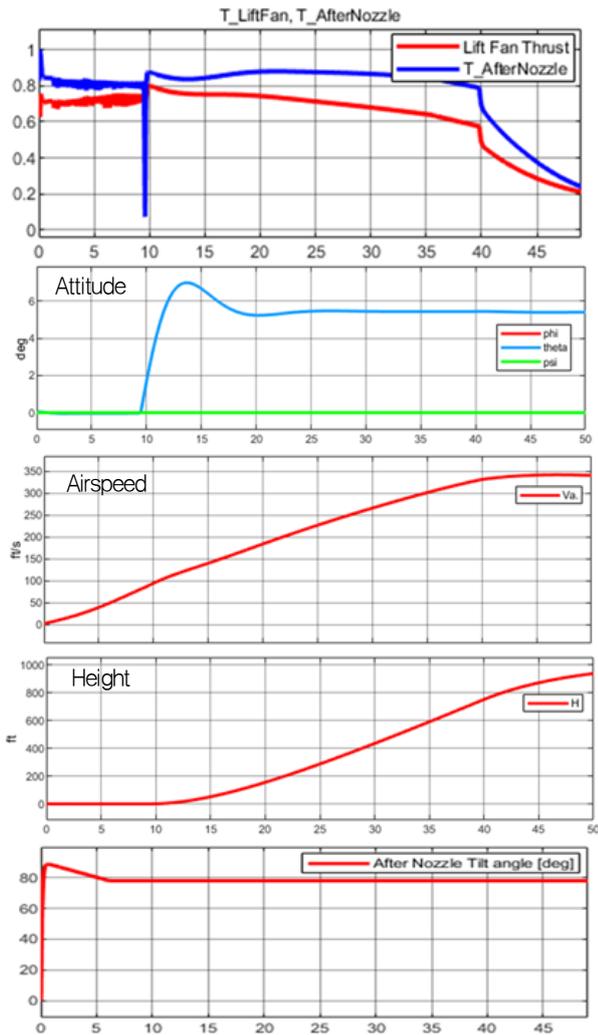


Fig. 4 Time history of a short take-off (STOVL) model

위치가 있어서 함재기의 수직 이동이 가능하도록 했다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 무게 중심으로부터 후방 11.18 ft 위치에 주 추진기가 있고 전방 12.8 ft 위치에 Lift Fan, 좌우 7.56 ft 위치에 자세 유지를 위한 추진기가 있는 것으로 가정하였다.

이 각각의 운동 모드에 대해서 문헌에 나와 있는 자료나 Digital DATCOM을 통하여 얻은 값들을 기반으로 공력 데이터를 결정하였다. 제어기 역시 각 모드별로 구분하여 설계하였다 (Lee et al., 2022). 이렇게 개발한 운동모델 및 제어기를 비행 데이터가 일부 공개되어 있는 유사기체(AV-8 Harrier)와 비교하였다 (Franklin, 2002). Fig. 3과 Fig. 4는 Harrier기와 본 연구에서 개발한 STOVL 모델의 이함 시 비행 데이터를 표시한 것이다.

Harrier의 경우 Fig. 3에서 Liftoff로 표시된 이함 시점에서 Flap과 Nozzle을 급격하게 사용하고 고도가 상승하기 시작한다. 본 연구에서 개발한 STOVL 모델의 경우는 정지 상태에서 375 ft 활주 후 1,000 ft까지 고도를 높이는 시나리오를 수행한 것으로 활주 후 이함 시점까지의 시간은 약 9.5 초이며 이함 시점에서 Harrier와 제어 수단은 다르지만 Nozzle과 Lift Fan 추력을 급격하게 사용한 것을 확인할 수 있다. 이함 후 고도를 올리는 비행 패

턴 또한 유사함을 알 수 있다. 두 함재기를 정량적으로 비교할 수는 없지만 정성적으로 유사한 비행 패턴을 보이고 있다.

2.2 갑판 이동 모델

함재기 이-착함 시뮬레이션과 관련하여 두 번째로 고려한 운동 모델은 비행갑판 상에서의 함재기와 트랙터 및 갑판 요원들의 이동에 관한 것이다. 이를 위해 우선 트랙터와 함재기의 바퀴에 의한 이동을 모의하는 기본 모델과 이 두 객체가 Towbar로 연결되어 이동할 때의 다물체 동역학 모델을 개발했다. Dugoff 타이어 모델을 이용하여 Towbar로 연결된 트랙터가 함재기를 견인하는 상황을 이상화하였다 (Oh et al., 2023; Yoo et al., 2024).

또한 시뮬레이션 중 갑판 상의 운동을 일일이 사람이 제어할 수 없으므로 갑판 상의 운동을 자동화하기 위해 비행갑판 상에서의 함재기 경로 생성 알고리즘 및 해당 경로를 실제 객체가 따라가기 위한 경로 추종 모델을 개발하였다.

Fig. 5는 비행갑판 상의 함재기가 착함 위치인 C2 구역에서 주기장인 A3 구역으로 이동하기 위해 트랙터를 이용한 견인 이동을 시뮬레이션한 궤적을 표시한 것이다. 경로 생성 시에는 이동 중에 A2 구역에 있는 기존 함재기와 같은 주변 장애물과의 충돌이 발생하지 않도록 충돌 회피 알고리즘이 적용되었다. 그림에서 주황색 점은 경로 생성 과정을 통해 결정된 변침점들이며 실선은 함재기의 이동을 점선은 트랙터의 이동을 나타낸다. 그림에서 보면 트랙터가 함재기의 이동 방향을 변경하기 위한 제어를 변침점 주변에서 수행하고 있음을 알 수 있다.

비행갑판 상에서는 함재기의 이동뿐만 아니라 함재기 이-착함을 지원하기 위한 다양한 갑판 요원들의 이동 및 활동이 있다. 갑판 요원들의 이동은 실제 사람의 이동 속도를 이용해 주어진 경로를 추종하는 형태로 구현하였다. 갑판 요원의 작업 시간은 함재기 이-착함 과정에서 필요한 무장 탑재나 점검, 급유 등의 활동에 필요한 시간을 Uniform 또는 Triangular 형태의 확률분포함수를 이용해 결정하는 방법을 사용하였다. Table 1은 함재기의 이함 전 무장 탑재부터 이-착함을 거쳐 착함 후 급유까지 일련의 과정에서 이루어지는 활동들을 나열한 것으로 이 중 갑판 요원의 작업과 관련된 항목들이 확률분포함수를 사용한다.

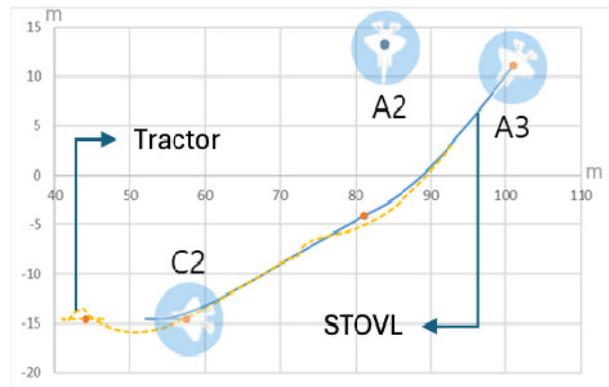


Fig. 5 Taxing of STOVL

Table 1 Deck operations and probability distributions

Process	Probability distribution	Simulation speed
Weapon loading	Uniform	Fast time
Pre-takeoff check	Triangular	Fast time
Engine start	Triangular	Fast time
Taxiing for takeoff	-	Real time
Takeoff	-	Real time
Mission	-	Real time
Landing	-	Real time
Engine stop	Uniform	Real time
Taxiing to parking lot	-	Real time
Post-landing check	Uniform	Fast time
Fueling	Triangular	Fast time

전체 이·착함 과정에서 갑판 요원들의 작업 시간이 차지하는 부분이 상당하므로 실제 시뮬레이션 시 갑판 요원들의 이동 또는 작업만 있을 경우에는 배속 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 함재기의 이동 및 이·착함 과정은 운동 모델을 실시간으로 계산하는 과정이므로 별도의 시간에 대한 확률분포함수 적용이 없다. 갑판 요원의 활동을 배속 시뮬레이션 하더라도 작업에 소요되는 시간을 배속 조건을 반영하여 전체 작업 시간에 합산하고 최종적으로 이·착함 시나리오 시간 추정에는 문제가 없도록 하였다.

2.3 함 운동

함재기 이·착함 통합 시뮬레이션 시범체계는 필요한 작전 성능을 만족하는 함 설계를 지원하기 위하여 개발된 시스템이다. 함재기 이·착함과 관련된 각종 등화 및 유도 설비, 아일랜드 형상과 갑판 배치 요소 등이 설계 과정에서 검토될 수 있도록 경험 요소를 대체하는 함 운동이 반영된 공학 기반 시뮬레이션 시범체계 개발이 목표이다. 따라서 모든 시뮬레이션 시범체계들은 설계된 함의 3D 모델과 내항 운동을 기반으로 운용된다.

이를 위해 실제 해상 상태를 반영하여 실시간으로 함의 내항 성능 정보를 공유할 수 있도록 해상 상태 정보로부터 시간 영역에서 함 운동 해석이 가능한 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 내항 성능 해석 시 함 형상 정보를 정확히 구현할 수 있도록 3차원 고차경계요소법이 적용되었으며 실시간 해석이 가능하도록 주파수 영역 해석 결과로부터 확보된 동유체력계수와 파랑 기진력을 시간 영역으로 변환한 Cummins (Cummins, 1962) 모델을 도입하였다. 또한 높은 파고에서 비선형 현상을 고려할 수 있도록 약비선형(weakly nonlinear) 모델을 함께 적용하였다 (Hong et al., 2024; Park et al., 2024).

시간 영역에서의 계산은 충격응답함수(impulse response function) 기반으로 이루어지며 구체적인 절차는 Fig. 6과 같다. 앞서 설명한 주파수 영역 해석을 통해 확보된 데이터를 입력으로 받아 실시간으로 시간 영역 해석을 수행하며 그 계산값을 통합 시뮬레이션 시범체계를 구성하는 개별 체계들과 역시 실시간으로 공유한다.

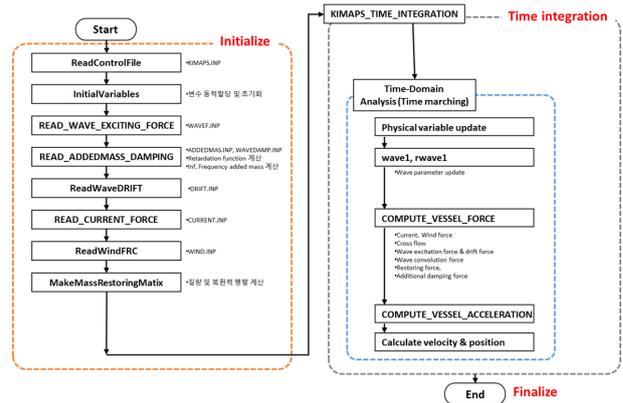


Fig. 6 Flow chart of real time sea-keeping program

함 운동은 갑판에서 트랙터나 함재기의 이동 계산 및 STOL 이·착함 환경 조건에 반영된다. 갑판 위 객체 이동의 경우 함의 경사로 인한 종력 방향 변화와 타이어에 작용하는 외력 등을 모두 고려한다. 함재기 이·착함 운동 모델의 경우 함의 운동은 함재기의 이함 시 초기 자세에 반영된다. 함의 속도와 바람 조건 또한 이함 시 함재기의 양력 계산에 반영된다.

처음 시뮬레이션 시범 체계를 설계할 때는 함의 운동으로 인해 갑판 위 객체들의 운동이 영향을 받을 것으로 예상했다. 하지만 밀지킬과 안정핀이 있는 경향모 개념 설계 모델을 검토한 결과 함재기 운용을 위한 설계 조건인 Sea State 3~6, 선수파 상황에서 함의 횡동요와 종동요가 STOL 운용 제한 조건으로 알려져 있는 2.5°와 1.5° 미만으로 나타났다 (Hong et al, 2024). 또 이러한 횡동요 조건에서 갑판 위 객체들의 이동을 시뮬레이션한 결과 횡동요가 없을 때와 비교했을 때 전체 이동 시간 차이는 10초 미만으로 주의를 요할만큼의 시간 지연이 발생하지는 않았다 (Yoo, 2024). 다만 함재기 조종사가 함재기를 제어할 때 착함 기준점이 되는 함의 자세가 변하는 가시적인 영향은 존재한다.

3. 통합 시뮬레이션

3.1 통합 시뮬레이션 시범체계 구성

함재기 이·착함 통합 시뮬레이션 시범체계는 함 운동을 시뮬레이션하면서 함의 관제 기능을 모의하는 함재기 관제임무 시뮬레이션 시범체계, 함재기의 비행 운동을 시뮬레이션하면서 함재기 조종 공간을 모의하는 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계, 비행 갑판 상에서의 함재기, 트랙터, 갑판 요원들의 운동을 모의하는 공간 활용 시뮬레이션 시범체계로 구성되어 있다.

함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계

함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계는 앞서 설명한 함재기 운동모델을 바탕으로 한다. 고정익 STOL 함재기의 조종 공간(cockpit) 목업을 이용하여 실제 함재기의 비행 상황을 모의하는 시뮬레이션 시범체계이다.



Fig. 7 Aircraft (STOVL) simulation system



Fig. 9 FLYCO simulation system

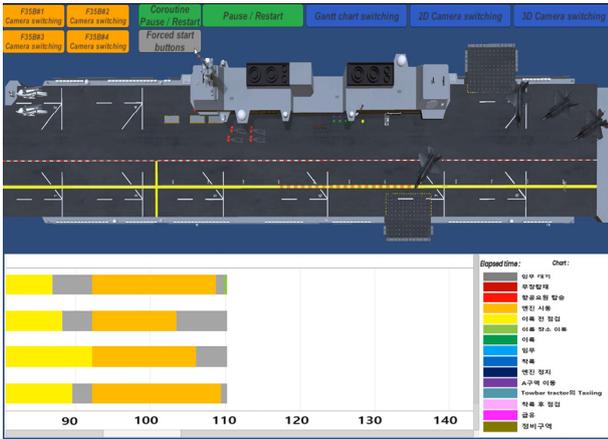


Fig. 8 Space utilization (flight deck) simulation system

함재기 이·착함 통합 시뮬레이션 시에는 네 대의 함재기가 하나의 편대를 이루어 이함 및 착함하는 상황을 모의한다. 이때 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계는 이 네 대의 함재기 중 한 대를 담당하고 나머지 세 대는 함재기 관제임무 시뮬레이션 시범체계에서 자동 제어한다.

공간 활용 시뮬레이션 시범체계

공간 활용 시뮬레이션 시범체계는 앞 장의 갑판 이동 모델을 바탕으로 개발된 시스템이다. 갑판 위에 배치된 함재기를 비롯한 모든 자원의 이동을 모의하고 이·착함 전 과정에서 소모되는 시간을 예측하는 역할을 한다. Fig. 8을 보면 갑판 상에서의 이동을 모의하면서 함재기 운용을 비롯한 각각의 작업에 걸린 시간들이 하부에 Gantt chart로 나타난다.

함재기 관제임무 시뮬레이션 시범체계

함재기 관제임무 시뮬레이션 시범체계는 함 운동을 시뮬레이션하면서 동시에 함의 관제 센터(FLYCO, Flying Control)를 모의한다. 또한 HMD(Head Mount Display)와 모션 인식 장치를 사용하여 이함 수신호나 착함 수신호를 제공하는 비행갑판의 신호수 활동도 구현하였다. FLYCO에서 정보를 획득하기 위한 레이더 설비와 각종 유도 설비 모의도 함재기 관제임무 시뮬레이션 시범체계

Table 2 Optical guidance system

System name	Main features and specifications
Deck edge lights	- Green or blue light - Indicates the edge of the flight deck and extent of the landing area for pilots and crew
Landing spot light	- Indicates the landing location of the aircraft - Consists of white and red lights
Flood light	- Lights to illuminate the landing spot
Homing beacon	- Provides ship location information to pilots by flashing white light 60-90 times per minute - Installed on the mast
Runway light	- Mark the runway during night take-off
Stop/Go light	- Send landing clearance signal to pilot - Signal examples Continuous green: Clearance for landing Continuous red: Standby in a traffic pattern
GLIS (Glide slope and long-range line-up indicator system)	- Positioned on the port bow and stern - Guidance to pilot on the appropriateness of the approach angle and location Blinking amber: High approach angle Blinking green: Normal approach angle Blinking red: Low approach angle
HIHAT (Height indicator hover aid thermometer)	- Guide to the final landing waiting position and altitude



Fig. 10 Landing spot lights

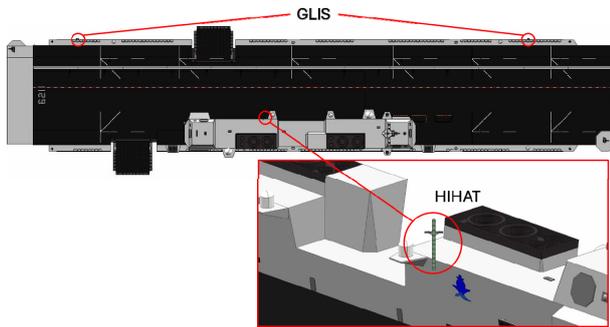


Fig. 11 Installation locations of HIHAT and GLIS

경향모에서 함재기를 유도하는 장비로는 크게 광학 유도 설비와 전파 유도 설비가 있다. 전파 유도 설비의 경우 함의 위치나 자세가 함재기에 표시되고 동시에 함재기의 위치 및 운동 정보가 함에 표시되는 기능을 제공한다. 다만 함 및 함재기의 운동을 가시화하는 것이 목적인 시뮬레이션 시범체계에서 가시화 되지 않는 전파 유도 특성값의 변화를 자세히 구현하는 것은 큰 의미가 없다. 따라서 본 연구에서는 FLYCO에서 사용하는 두 종류의 레이더 화면만 구현하였다. 해당 레이더 시스템은 ASR(Airport Surveillance Radar)과 PAR(Precision Approach Radar)이다. 광학 유도 설비의 경우 실제 해외 유사 함정의 사례들을 바탕으로 주어진 함 형상에서 설치 가능한 설비들을 검토하고 구현하였다. 최종 시뮬레이션 시범체계에 구현한 광학 유도 설비는 Table 2와 같다.

광학 유도 설비 관련 하나의 사례로 아간에 전체 착함 위치 유도등을 작동시킨 모습이 Fig. 10에 나와 있다. 전체 착함 위치의 유도등을 작동시킬 수도 있고 특정 위치만 작동시킬 수도 있다.

Fig. 11에는 HIHAT과 GLIS의 설치 위치가 나와 있다. 통합 시뮬레이션 중에 함재기의 조종사는 GLIS가 녹색으로 보이는 각도를 유지하면서 함에 접근한다. 또한 HIHAT을 이용하여 함 좌현에서의 호버링 위치와 적절한 높이를 찾는다.

3.2 시뮬레이션 시범체계 연동

함재기 이-착함 통합 시뮬레이션은 개별 시뮬레이션 시범체계들이 IEEE 1278 DIS(Distributed Interactive Simulation) 표준에 따라 연동되어 이루어진다(Fig. 12). 이를 위해 DIS 표준에 따라

시뮬레이션 시작 및 종료 명령, 환경 및 초기값 설정, 각 객체들의 상태 정보를 교환하기 위한 PDU(Protocol Data Units)를 설계하였다.

Fig. 12를 보면 함재기 운동을 계산하는 함재기 이-착함 시뮬레이션 시범체계, 함 운동을 계산하는 함재기 관제임무 시뮬레이션 시범체계, 갑판 위 객체들의 운동을 계산하는 공간 활용 시뮬레이션 시범체계가 모두 DIS 표준에 따라 연동된다.

통합 시뮬레이션에 사용된 PDU들은 Table 3과 같다. 시뮬레이션 중 개별 객체들의 정보를 교환하기 위하여 Entity State 타입 PDU들을 사용하였고 초기값들을 설정하기 위하여 Set Data 타입 PDU들을 사용하였다.



Fig. 12 Architecture of integrated simulation system

Table 3 Design of PDUs

PDU type	PDU name	Note
Entity state	EntityCVX	Ship information
	EntitySTOVL	STOVL information
	EntityHELO	HELO information
	EntityLSO	Landing signal officer information
	EntityDECK_tractor	Tractor information
	EntityDECK_officer	Deck officer information
Transfer ownership	Transfer	Transfer of ownership
Event report	TransferRep	
Start/Resume	StartResume	Start/stop control
Stop/Freeze	StopFreeze	
Acknowledge	Ack	Acknowledgement
Acknowledge-R	Ack-R	
Set data	SetORG	Initial environment information
	SetENV	
	SetWAKE	
	SetDECK	Initial object information
	SetCVX	
	SetSTOVL	
	SetHELO	
	SetLSO	
SetDECK_Tractor		
SetDECK_Officer		

3.3 통합 시뮬레이션 시나리오

함재기 이·착함 시뮬레이션은 앞서 설명한 개별 시뮬레이션 시범체계가 모두 연동된 상태에서 주간이나 야간, Sea State 등 다양한 환경 조건 하에 네 대의 함재기로 이루어진 한 편대의 이함 및 착함의 전 과정을 모의하는 형태로 진행되었다.

Fig. 13은 함재기 이함 시 적용된 시나리오의 Sequence Diagram이다. 그림에서 FLYCO는 함재기 관제임무 시뮬레이션 시범체계, STOVL #4는 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계, DECK는 공간 활용 시뮬레이션 시범체계를 나타낸다. 또한 Officer는 FLYCO에서 전체 이·착함 과정을 통제하는 관제사를 의미한다.

시뮬레이션은 FLYCO의 관제사가 음성으로 이함을 위한 이동 명령을 내리면서 시작한다. 그 다음에 함재기 제어에 대한 소유권이 시작 시에는 함재기 관제임무 시뮬레이션 시범체계와 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계에 있다가 갑판 이동을 위해 그 소유권을 공간 활용 시뮬레이션 시범체계에 전달하고 이동이 종료되면 다시 돌려받는 절차가 진행된다.

이함 순서는 관제사의 지시에 따라 변경될 수 있지만 그림에서는 관제임무 시뮬레이션 시범체계에서 제어하는 함재기 세 대(STOVL #1~#3)를 먼저 이함시키고 마지막으로 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계에서 사람이 수동 조종할 수 있는 함재기(STOVL #4)를 이함시켰다.

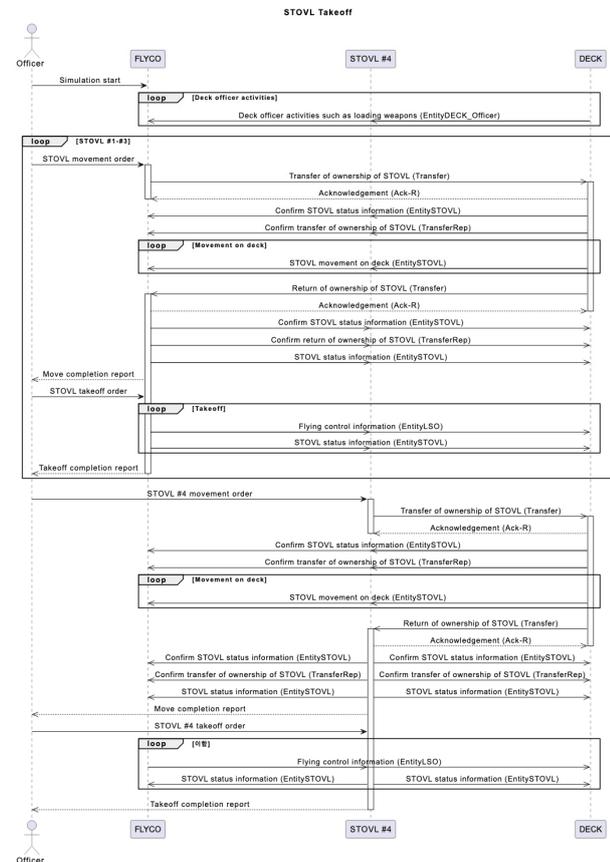


Fig. 13 STOVL take-off procedure

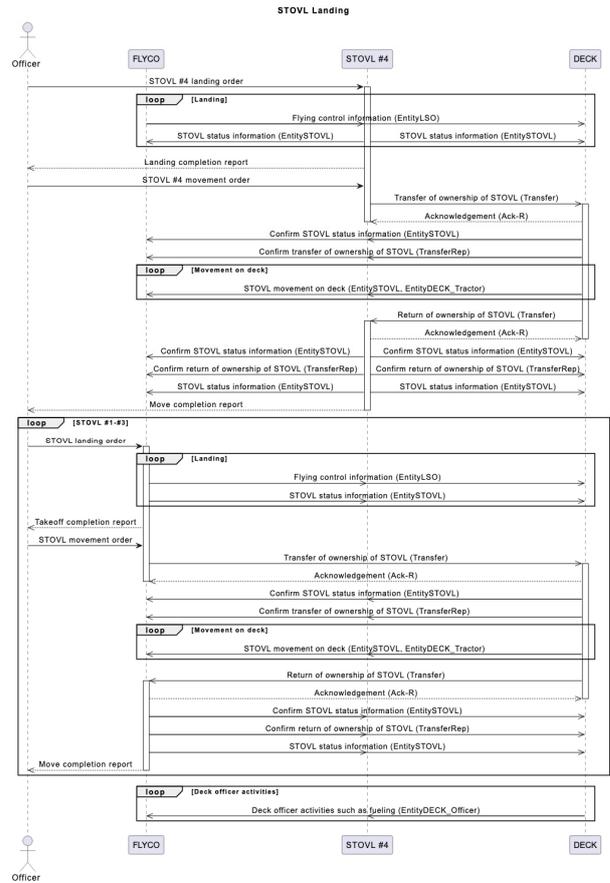


Fig. 14 STOVL landing procedure

Fig. 14는 함재기 착함 과정에 대한 Sequence Diagram이다. 이함 절차는 갑판 요원의 무장 탑재와 이함 전 점검으로 시작하지만 착함 과정은 갑판 요원의 주유와 착함 후 점검으로 종료된다. 이함 과정과 마찬가지로 함재기 관제임무 시뮬레이션 시범체계에서 자동 제어하는 함재기들(STOVL #1~#3)과 수동 제어가 가능한 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계의 함재기(STOVL #4)를 구분하고 있다. 이 시나리오에서는 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계의 함재기 조종사가 항모 주변 공중에서 대기하는 부담을 덜어주기 위해 다른 함재기들보다 먼저 착함시켰다.

통합 시뮬레이션의 시나리오는 미 해군익의 V/STOL Shipboard and Landing Signal Officer NATOPS Manual 내용을 참조해서 작성했다 (NAVAIR, 2004). 시계가 확보된 상태에서 야간에 함재기가 복귀할 때의 기본 패턴을 활용하였으며 시뮬레이션 중에는 주야간에 따른 복귀 패턴 변화를 고려하지 않았다. 다만 이 패턴도 함재기를 자동 제어할 때 따르는 항로이고 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계를 이용한 수동 제어 시에는 단지 권고 사항일 뿐이다. 실제 비행 패턴은 조종사의 결정에 따라 변경된다. 참고로 한 비행 패턴은 Fig. 15와 같다.

Fig. 15에서 주의 깊게 본 조건은 [Groove - Hover Stop - Abeam Landing Spot - Over Spot]으로 이어지는 착함 과정이다. 그림을 보면 항모로부터 거리 1.3~1.5 해리(nautical mile), 고도 500~550ft에 위치하는 groove 지점에서 고도를 낮추고 속도를

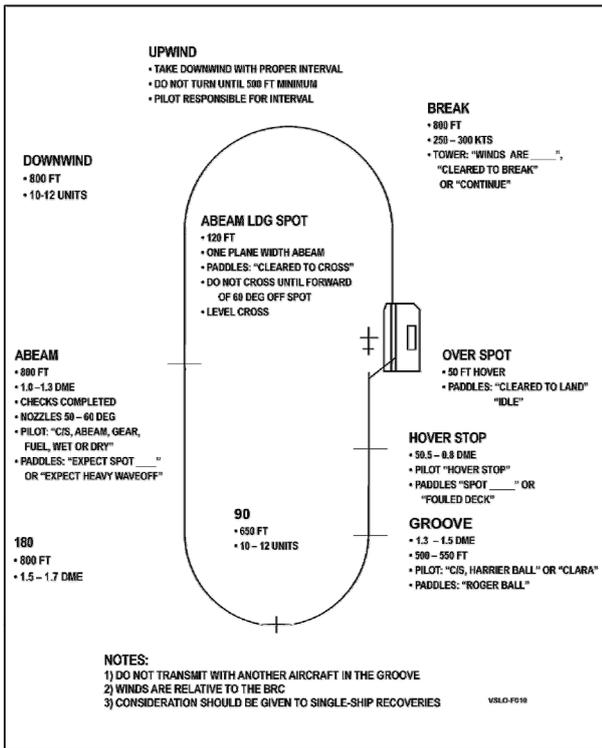


Fig. 15 Night case recovery pattern (NAVAIR, 2004)

줄이기 시작한다. 이 때 비행 경사각은 3°를 유지한다. 이러한 하강은 항모로부터 거리 0.5~0.8 해리 떨어진 hover stop 지점까지 이루어진다. Hover stop 지점부터는 고도 120ft를 유지하면서 착함 지점 옆으로 접근한다. 이 때 항모와 함재기 사이의 측면 방향 거리는 함재기 폭만큼을 유지한다. 이렇게 접근한 지점이 abeam landing spot이다. 여기서부터는 갑판의 착함 지점 위인 over spot으로 이동한다. 이 때 함재기 고도는 갑판으로부터 50ft를 유지한다.

앞서 3.1절에서 설명한 광학 유도 설비는 위와 같은 착함 시나리오를 안내할 수 있도록 설정하였다. GLIS는 groove 지점에서 hover stop 지점으로 이동할 때 3° 하강 각도를 유지할 수 있도록 안내하며 HIHAT은 abeam landing spot 위치와 over spot의 갑판 위 높이를 안내한다. 주어진 항모 개념 설계 모델에 대하여 본 연구를 통해 배치한 광학 유도 설비가 필요한 정보를 제공할 때 문제가 없는지는 실제 사람이 조종하는 함재기 이·착함 시뮬레이션 시뮬체계를 이용하여 확인하였다.

3.4 통합 시뮬레이션 실행 사례

본 절에서는 함재기 이·착함 통합 시뮬레이션 시뮬체계의 실행 사례들을 소개한다. 전체 시뮬레이션 상황은 일련의 동영상 파일로 기록되지만 본 논문에서는 시뮬레이션 중 주요 상황들 위주로 살펴보겠다.

Fig. 16은 함재기 이함 전에 붉은색 상의를 입은 무장 탑재 요원들이 무장 트레일러를 끌고 이동 중인 모습을 보여주고 있다. 함재기 관제임무 시뮬레이션 시뮬체계의 FLYCO 위치에서 보이

는 모습이지만 실제 이동 계산은 공간 활용 시뮬레이션 시뮬체계에서 이루어진 결과이다.

Fig. 17은 FLYCO 위치에서 바라본 STOVL 함재기의 이함 장면이다. 함재기 관제임무 시뮬레이션 시뮬체계에서 구현한 영상이다. 그림을 보면 단거리 이함을 위해 주 추진기 방향을 하방으로 향하도록 하고 조종석 뒤쪽의 lift fan 해치를 연 모습을 볼 수 있다. 함재기의 이함 중 위치와 자세 변화는 함재기 이·착함 시뮬레이션 시뮬체계에서 실시간으로 계산한 상태 정보를 공유한 결과이다.



Fig. 16 Ordnance handlers seen from FLYCO



Fig. 17 STOVL take-off seen from FLYCO



Fig. 18 STOVL take-off seen from the cockpit mockup



Fig. 19 STOVL approaching the carrier



Fig. 21 STOVL taxiing seen from the cockpit mockup



Fig. 20 STOVL taxiing seen from FLYCO

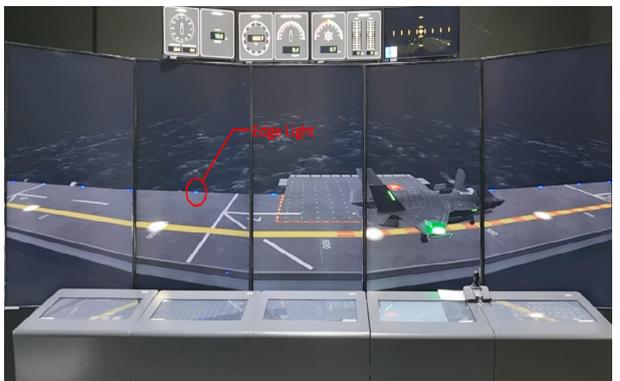


Fig. 22 STOVL night take-off

Fig. 18은 동일한 시나리오 및 시뮬레이션 환경에서 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계의 함재기 조종석 위치에서 바라본 이함 환경을 보여주고 있다. 노란색 상의를 입은 갑판 신호수의 이함 수신호에 따라 이함을 위한 함재기 가속이 시작된 상황이다. 갑판 신호수의 이함 수신호는 함재기 관제임무 시뮬레이션 시범 체계에서 전달된 정보이다.

Fig. 19는 착함을 위해 경향모 후미에서 접근 중인 함재기의 모습을 보여주고 있다. 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계의 함재기 조종석 위치에서 경향모의 모습이 보이고 있다.

Fig. 20은 함재기가 임무 수행 후 착함한 상태에서 주기장으로 함재기를 이동시키기 위해 트랙터가 접근하는 모습을 FLYCO 위치에서 바라보고 있는 상황이다. 함재기 관제임무 시뮬레이션 시범체계를 이용하여 FLYCO 위치에서 바라보는 영상이지만 실제 함재기와 트랙터의 갑판 위 이동은 공간 활용 시뮬레이션 시범 체계에서 실시간으로 계산한 결과이다.

Fig. 21은 착함 후 함재기가 트랙터에 의해 주기장으로 이동된 모습을 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계의 조종석 위치에서 바라본 모습이다. 역시 공간 활용 시뮬레이션 시범체계의 갑판 위 이동 계산을 공유 받아 영상으로 구현한 것이다. 그림을 보면 다음 함재기가 수직 착함을 위해 갑판 상공에 정지해 있는 모습을 볼 수 있다. 3.1절에서 설명한 것처럼 한 편대를 구성하는 네 대의 함재기 중 함재기 이·착함 시뮬레이션 시범체계에서 제어하는 한 대를 제외한 나머지 세 대는 함재기 관제임무 시뮬레이션

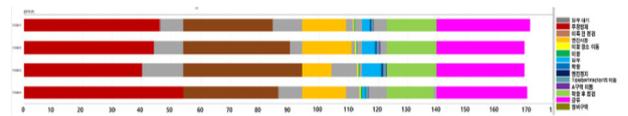


Fig. 23 Total simulation execution time

시범체계에서 제어한다. 그림에서 착함 중인 함재기 또한 함재기 관제임무 시뮬레이션 시범체계에서 보낸 정보를 영상에 나타낸 것이다.

Fig. 22는 야간에 함재기가 이함을 위해 이함 위치에 대기 중인 상황을 FLYCO에서 바라보고 있는 모습이다. 그림을 보면 runway light와 deck edge light가 켜진 상태에서 함재기도 주요 등화를 켜 상태로 이함 준비가 완료된 상태임을 알 수 있다.

Fig. 23은 공간 활용 시뮬레이션 시범체계에서 함재기 이·착함 과정의 각 작업에 걸린 시간을 Gantt chart로 나타낸 것으로 전체 시뮬레이션 시간에 대해 합쳐서 표시한 것이다. 그림을 보면 전체 시뮬레이션은 이함 전 무장 탑재부터 시작해서 착함 후 급유까지의 과정으로 진행되었음을 알 수 있다. 네 대의 함재기가 움직이기 때문에 표시도 네 개로 나뉘어져 있으며 전체 편대가 이함하자마자 다시 착함하는 시나리오이기 때문에 그림에서 하늘색으로 표시된 임무 수행 시간이 매우 짧게 나타나고 있다. 임무 수행 시간이 매우 짧은 조건에서 전체 함재기 이·착함 과정이 약 170분 정도 걸린 시나리오이다.

지금까지 STOVL 함재기가 주간에 이함하고 착함하는 주요 장면들을 살펴보고 있다. 또한 야간과 같이 환경을 변경한 상태에서도 시뮬레이션을 수행하였음을 보였다. 네 대의 함재기가 한 편대를 이루어 주·야간 등 다양한 환경에서 이·착함 시나리오를 수행할 때 함의 설계 요소들이 어떻게 가시화되는지, 실제 이·착함 과정에 소모되는 시간은 어떻게 되는지 등 다양한 작전 요구 성능들을 확인할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여 경향모 설계 초기 단계에서 함재기 이·착함 시나리오를 가시화하고 점검할 수 있는 시뮬레이션 시범체계를 개발하였다. 설계 대상인 함의 운동은 모형시험과 수치해석을 통해 상세하게 모의하고 STOVL 함재기는 정성적인 운동 특성이 드러날 수 있도록 운동모형을 개발하였다. 갑판 상에서 함재기와 트랙터의 이동, 갑판 요원들의 활동을 모의할 수 있는 시뮬레이션 시범체계 또한 개발하였다.

실제 개발은 고정익 STOVL 함재기뿐만 아니라 회전익 함재기에 대해서도 수행하였고 경향모 환경에서 회전익 함재기를 어떻게 운용할 수 있는지 확인하였다. 다만 경향모 설계에 STOVL 함재기가 훨씬 큰 영향을 미치기 때문에 본 논문에서는 회전익 함재기 시뮬레이션에 대한 개발 결과 소개를 생략하였다. 또한 공간 활용 시뮬레이션 시범 체계는 정비 구역에서의 이동도 시뮬레이션하였지만 역시 본 논문에서는 생략하였다.

개발된 시뮬레이션 시범체계들을 모두 통합하여 함재기 이·착함 통합 시뮬레이션 시범체계를 구성한 후 경향모 개념설계 모델에 대해 고정익 및 회전익 함재기의 주·야간 이·착함 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 광학 유도등의 위치와 효과를 가시적으로 확인할 수 있었고 한 편대의 이·착함 과정에 소모되는 시간을 실제와 유사하게 추정할 수 있었다.

향후 경향모 설계 과정에서 본 연구 결과를 활용하여 명확한 요구 조건 설정 및 설계 검토를 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

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

References

- Cummins, W.E., 1962. *The Impulse Response Function and Ship Motion*. Department of the Navy, David Taylor Model Basin. Hydromechanics Laboratory, Research and Development Report 1661.
- Franklin, J.A., 2002. *Dynamics, control and flying qualities of V/STOL aircraft*. AIAA.

Table 4 Acronyms

Acronym	Meaning
ASR	Airport surveillance radar
CTOL	Conventional take-off and landing
DIS	Distributed interactive simulation
DME	Distance measuring equipment
FLYCO	Flying control
GLIS	Glide slope and long-range line-up indicator system
HIHAT	Height indicator hover aid thermometer
HMD	Head mount display
LSO	Landing signal officer
NATOPS	Naval air training and operating procedures standardization
PAR	Precision approach radar
PDU	Protocol data units
RVL	Rolling vertical landing
SL	Slow landing
STOL	Short take-off and landing
STOVL	Short take-off and vertical landing
VTOL	Vertical take-off and landing

- Hong, S.Y., Park, D.M., Jung, J.H., Seo, M.G. and Cho, S.K., 2024. A study on Short-Take-Off and Vertical Landing (STOVL) performance evaluation of a light aircraft carrier and a consistent analysis of Safe Operating Envelope (SOE). *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 61(2), pp.125-234.
- Jons, O.P., Ryan, J.C. and Jones, G.W., 1994. Using virtual environments in the design of ships. *Naval Engineers Journal*, 106(3), pp.91-106.
- Lee, J., Jang, S., Jeaong, H., Kim, S. and Suk, J., 2022. Takeoff and landing performance analysis for aircraft carrier operation of STOVL aircraft. *Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology*, Niigata City, Japan, October 2022.
- NAVAIR, 2004. *V/STOL shipboard and landing signal officer NATOPS manual*. NAVAIR 00-80T-111.
- Oh, J., Hong, S.Y. and Hong, S., 2023. A study on analytical method of driving characteristics of carrier aircraft towing vehicles using dynamic simulation. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 60(4), pp.288-295.
- Park, D-M, Seo, M-G, Song, H., Cho, S-K. and Hong, S.Y., 2024. Evaluation of seakeeping performance of an light aircraft carrier. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 61(5), pp.297-311.

Walker, G., Wurth S. and Fuller J., 2013. F-35B integrated flight-propulsion control development. *International Powered Lift Conference*, Los Angeles, CA, August 2013.

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.



이 한 진



홍 사 영



김 용 환



유 원 선



박 광 필



김 승 균



신 현 옥