

시뮬레이션 기법을 적용한 군용 항공기 소요 산정 모형

김상민 · 이문걸*

Military Aircrafts Proper Quantity Decision Model Using Simulation Analysis

Sang-min Kim · Moon-gul Lee*

ABSTRACT

It is very important to evaluate proper acquisition of military aircraft against future threats in our military defense field. In previous studies, the evaluation has been determined in terms of tasking order or weapon power index. These methods compare the combat-effectiveness index and the number of aircraft. However, this study provides simulation analysis of proper quantity decision based on actual operational scenarios of military aircraft using System Dynamics. The method reflects the properties of military aircraft operation concepts and considers the rate of failure of main systems on subsystems, as well as repair and crash rates caused by differentials in peacetime and wartime frame.

Key words : Military aircrafts proper acquisition, System Dynamics

요약

군에서 향후 미래 위협에 대비한 군용 항공기의 적정 소요를 분석하는 일은 중요하다. 이전의 연구들은 작전 임무수행 측면과 전력지수의 비교를 통하여 적정 소요를 분석하였다. 이 방법들은 단편적인 항공기의 전투 효과 지수와 수량 측면에서의 비교만을 실시하였다. 그러나 본 연구에서는 시스템 다이내믹스를 통한 군용 항공기의 실제 운용 시나리오에 기반한 시뮬레이션 분석을 실시한다. 군용 항공기 운용 개념의 특성을 반영하여 하부 주요 시스템의 고장률과 수리율, 잔여시 차별로 발생되는 피격률을 통해 적정 소요량을 산출한다.

주요어 : 군용 항공기 적정 소요, 시스템다이내믹스

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 전쟁 수단의 첨단화, 정밀화 등으로 전쟁의 양상이 바뀌고 있으며, 인공위성과 같은 첨단 정보수집 수단과 장거리 정밀유도무기 등의 출현으로 적에 대한 정밀 타격이 전전후 가능해졌다. 미래전은 탐지, 인식 및 타격 수단을 네트워크화하고 첨단 전자통신기술을 이용한 정보우위 달성, 신속 결전 작전, 승수효과 달성을 위한 동시 및 통합작전이 예상된다.

이를 위해 군에서는 한반도 전장 환경과 작전운용 환경에 부합한 무기체계(항공전력) 확보를 위한 연구를 실시중이다.

무기체계란 범위가 넓고 복잡하여 여러 가지 내용으로 기술된다. 합동참모본부에서 발행한 합동무기체계에서는 ‘전투수단을 형성하는 장비와 그의 조작 및 운용기술을 망라한 복합체’라고 정의하며, 군사학 대사전에서는 군수 지원적 용어와 무기분석적 용어로 정의한다. 군수지원적 용어는 폭격기, 미사일 같은 전투용 기구와 이를 운반하는 부수 장비, 지원시설 등을 포함하는 총체적 체계라 한다. 무기분석적 용어는 구성요소가 복잡하게 결합되는 하나의 전투용 기구를 의미한다. 이상의 여러 가지 참고자료의 공통점으로 무기체계란 무기와 관련된 물적 요소와 인적 요소의 종합체계로서 전투수행과정에서 무기의 사용목적을 달성하는데 필요한 도구, 물자, 시설, 인원 보

Received: 22 November 2014, **Revised:** 8 December 2014,
Accepted: 18 December 2014

*Corresponding Author: Moon-gul Lee
E-mail: mglee@mnd.mil
Korea National Defense University

급, 그리고 전술, 전략 및 훈련 등으로 이루어진 전체의 체계라 말할 수 있다⁶⁾.

무기체계의 발전은 적의 위협에 대비한 능동적 억제전략 추구가 가능하고, 전시에는 무기체계에 따른 다양한 전술과 전략의 구현이 가능하다. 또한 해외 발전 추세에 부응한 국방기술 발전을 이룰 수 있다.

본 연구에서는 이런 무기체계 중에 정책적, 경제적 효과가 큰 군용 항공기를 중심으로 연구하고자 한다. 전·평시 작전환경을 고려한 항공기의 작전개념을 설정하고, 항공기 운용 방법에 따른 적정 소요량과 운용률을 판단한다. 시스템다이내믹스를 통해 항공기의 운용 시나리오별 소요량을 판단하며, 항공기의 피격, 고장, 수리 발생을 시나리오의 주요 요소로 선정하여 상호 연관성과 시간적 변화 행태를 분석한다.

이를 통해 저비용 고효율의 정책적 구상으로 전·평시 효율적 작전 수행 보장에 기여할 것으로 판단되며, 전력 공백 문제를 해결하기 위한 도입사업에도 활용이 될 것이다.

1.2 기존연구 검토

기존의 소요 연구들은 대다수가 전투기 및 무인항공기, 군수품 등을 중심으로 이루어졌다. 본 연구에서는 기존의 전투기 및 무인항공기, 군수품 중심 연구를 검토·보완하고, 기타 소요량 산출 모형을 활용하여 고비용을 요구하는 군용 항공기를 중심으로 연구하고자 한다.

적정 소요에 대한 연구는 분석 기법에 따라 다양하게 이루어졌다. 국내 논문에서 Lim,J.D.^[15]는 대기행렬을 이용하여 무인항공기가 피격될 때까지의 확률과 운용시간에 대한 연구를 하였으며, Son,Y.S.^[22]는 마코프체인을 이용하여 항공기 적정소요를 도출하였다. Pack,J.G.^[18]는 공대지 임무를 수행하기 위한 항공기 소요를 선형계획법으로 판단하였으며, Song,C.H.^[23]는 목표계획법을 이용하여 근접항공지원을 위한 최적할당 모형을 제시하였다. Kim,H.C.^[7]은 K-1 전차 수리부속품에 대한 소요산정 모델을 제시하였고, Lee,Y.U.^[14]는 응급차 최적 대수 산출 및 배차에 관한 시뮬레이션 연구를 실시하였다.

이처럼 대기행렬, 최적화, 시뮬레이션의 분석기법을 통한 소요산정에 관한 연구가 많이 존재하며, 특히 군에서는 수리부속과 관련된 군수품의 소요산정에 대해 많은 연구가 이루어졌다.

기존 연구는 특정 임무나 소요산정에만 국한되어 전·평시 임무특성과 주요 변수의 영향을 분석하여 소요량의 적정성을 판단하는데 적합성을 찾기는 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 시스템다이내믹스를 통해 전·평시 임무에

부합하는 상황을 가정하고, 주요 변수와 적정 소요의 관계 분석을 실시한다.

본 연구의 구성은 2장에서 시스템다이내믹스의 이론적 배경을 언급하고, 3장에서는 시스템다이내믹스를 통한 군용 항공기 소요량 산정 모형을 제시한다. 타당성 분석을 통한 모형 구현의 적합성을 확인하여 4장에서는 소요량 산정 모형을 적용한 사례 연구를 실시하고, 5장에서는 연구결과를 정리하고 향후 연구방향을 기술한다.

2. 이론적 배경

2.1 시스템다이내믹스의 특성

시스템다이내믹스(System Dynamics)란 시스템(System)과 다이내믹스(Dynamics)의 결합어이다. 시스템(System)이란 관찰하고자 하는 어떤 대상, 공간상의 영역, 혹은 어떤 물질의 양이며, 경계(Boundary)에 의하여 다른 사물과 구분되어진다. 다이내믹스(Dynamics)란 시간 변화에 따라서 대상이 변화하는 것을 의미한다. 상식적으로 시스템은 관련된 구성 요소들의 결합으로 여겨지므로 시스템다이내믹스는 연결된 구성요소들이 시간의 흐름에 따라서 변화하는 행태(Time-Varying behavior)를 다루는 것이다⁸⁾.

시스템다이내믹스는 1961년 미국 MIT 대학의 Jay. W. Forrester 교수가 산업동태론(Industrial Dynamics)에서 처음으로 언급하였다. Jay. W. Forrester 교수의 정의는 시스템의 구조적인 특성과 함께 시스템을 통제, 관리하는 정책과 의사결정을 함께 연구하여 시스템과 의사결정자를 연결시켜주는 정보 네트워크의 중요성을 강조한다. 나아가 시스템과 의사결정자의 연결을 저해하는 가장 중요한 요인 중의 하나인 물질적, 정보적 지연(delay) 역시 중요한 요소로 취급한다.

시스템다이내믹스 기법은 처음에는 정책의 설계 도구로 개발되었다. 1970년대에는 세계 환경 모델링과 국가 경제 모델의 거시적 연구에 사용되었고, 1980년대에는 기업조직의 동태적 적응과정에서 의사결정을 지원하는 방법론으로 연구되었다. 현재에는 산업체의 경영전략, 수요 예측, 에너지 및 환경문제, 의사결정 도구 등 모든 산업분야에서 폭넓게 응용되고 있다.

시스템다이내믹스는 사용하는 컴퓨터 언어에 의해서 제한되는 것이 아니고 문제를 접근하는 개념적 방식에 따라 정의되어야 한다.

시스템다이내믹스는 시뮬레이션 과정에서 피드백(Feedback)을 고려하고, 시행착오(Trial and Error)로 해를 찾는 특징이 있다. 시행착오로 해를 찾는 과정은 시나리오

접근법이라고도 하며, 시뮬레이션 결과를 원인추적 기능에 이용하여 분석함으로써 문제의 이해에 도움을 준다. 따라서 현실을 반영하는 피드백 구조를 통한 문제의 탐색과 분석을 통하여, 문제해결을 위해 채택한 대안의 영향이나 환경의 변화 등을 다양하게 분석할 수 있다는 특징이 있다.

2.2 시스템다이내믹스 분석 방법

시스템다이내믹스는 문제의 근원이 되는 원인구조를 밝힘으로써 구조에서 문제에 대한 해결을 찾으려는 시도이므로 시스템에서 나타나고 있는 현재의 상황은 반드시 이전 시스템의 결과가 원인으로 작용한다. 이러한 모델의 구조와 효율성 달성을 위해서는 시스템적 사고를 갖추어야 한다. 시스템적 사고란 시스템을 구성하는 상호 의존적 변수들 간의 관계를 고찰하여 이들 사이의 순환고리를 이해하는 사고체계이다.

시스템다이내믹스의 방법론은 시뮬레이션과 인과지도 분석으로 구분된다. 접근방법에 있어서는 동일한 모습을 나타내지만 시스템에 대한 분석에 있어서 시뮬레이션은 Stock / Flow 데이터에 초점을 두며, 인과지도 분석은 시스템의 인과관계에 초점을 두어 시스템의 동태적·순환적 구조를 파악하여 함의를 구한다.

시뮬레이션 연구절차를 J. Rander^[19]는 개념화(conceptualization), 모형구축(formulation), 실험(testing), 적용(implementation)의 4단계로 구분한다. 개념화는 적용하고자 하는 시스템의 경계와 변수를 설정하는 단계이며, 모형구축은 앞서 설정한 경계를 토대로 변수 상호간의 인과관계를 추출하여 인과지도와 Stock / Flow Diagram을 작성하는 것이다. 실험은 작성한 Stock / Flow Diagram에 저장과 유량 데이터를 투입하여 시뮬레이션 분석을 하는 단계이며, 적용은 시뮬레이션 결과를 통해 현실을 예측하는 단계이다.

인과지도 분석 연구절차를 살펴보면 개념화 단계는 동일하며, 모형구축 단계는 인과지도의 작성을 실시하고 Stock / Flow Diagram 구축과정이 생략된다. 실험 단계에서는 인과지도도를 통한 행태 분석이 이루어진다.

두 가지 분석의 핵심적인 차이점은 모델구축 과정에서 이루어지는 인과지도 타당성 검증에 대해 시뮬레이션 연구절차의 경우 개략적인 변수간 인과관계가 의심되거나 저장 / 유량화하기 어려운 자료를 중심으로 인과지도의 검증이 이루어진다는 것이다. 방법은 모델(Stock / Flow Diagram)에 대해서 투입 변수의 값을 극단적으로 상정하여 산출되는 수치의 타당성을 통한 검증을 실시하는 것이

다. 반면, 인과지도 분석기법에 있어서는 인과지도에서 나타나는 개별 변수간 인과관계에 있어 모순이 있는가와 시스템 경계설정의 적절성에 대해서 검증이 이루어진다.

3. 군용 항공기 소요량 산정 모형

3.1 연구모형 설정

본 연구는 실제 운용 시나리오에 기반한 시뮬레이션 분석을 통해 군용 항공기 작전을 가정하여 분석을 실시한다.

군용 항공기 작전 수행시 전·평시 임무수행 조건과 운용 개념은 다르게 설정된다. 전·평시의 발생 피격률이 다르며, 운용되는 항공기 대수의 차이에 따라 작전 시간이 달라진다. 항공기의 임무수행이 가능하기 위해서는 주요 구성품별 고장 발생이 고려되어야 하며, 고장 부품별 수리가 이루어져야 한다.

고장 발생은 주요 부품들의 가동 시간 증가에 따라 고장간 평균시간(MTBF: mean time between failure)과의 비교를 통하여 발생하는 것으로 한다. 부품들의 고장 발생은 항공기 작전 불가 상태를 만들고 예비 부품의 재고량에 따라 수리를 하게 된다. 수리를 마친 항공기는 작전 준비를 하고 투입시간에 따라 작전을 실시한다.

고장 발생시 예비부품을 보유하면 수리가 24시간 내에 완료되고, 예비부품을 추가 보급 받을 경우 1일(또는 부품별 보급기간)이 추가로 소요됨을 가정한다. 또한 피격상황의 발생은 확률적인 수치를 적용한다.

피격과 고장은 각각 독립적으로 발생하고, 고장 발생의 주요 부품은 항공기 임무수행의 핵심 구성품인 엔진, 레이다, 전산장비, 통신장비로 한정하였다. 핵심 구성품은 항공기 운용시 필수적인 부품을 중심으로 선정하였으며, 기타 부품의 고장 발생은 고려하지 않았다.

항공기 총 보유 대수는 N대이며 항시 작전은 K대가 수행을 하고, 항공기별 1일 12시간 작전을 실시한다. 작전의 지속성을 위해 항공기별 작전 시간의 변화는 가능하다. 항공기 이·착륙 시간과 작전지역으로 이동시간은 고려하지 않는다.

Fig. 1은 기본 모형으로 총 항공기 수(작전 가능 항공기)를 중심으로 고장이나 피격이 발생하면 발생 대수만큼 총 항공기 수가 줄어들고, 고장 항공기의 정비가 완료된 후 수리된 항공기 수만큼 총 항공기 수는 증가하게 된다. 피격된 항공기 수가 최초의 총 항공기 수와 같으면 작전 불가 상태가 된다. 기본 모형을 중심으로 고장, 수리, 피격 발생 모듈을 확장하여 소요량 분석을 실시한다.

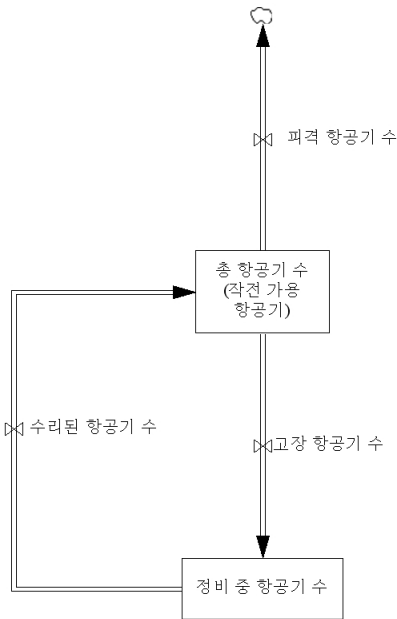


Fig. 1. Basic Model

3.1.1 고장발생 및 정비

항공기 주요 구성품인 엔진, 레이더, 전산장비, 통신장비의 고장을 묘사하기 위해 MTBF를 사용하고 수리 가능한 시스템에서 MTBF는 고장률 λ의 역수이다. 신뢰도 함수에 따라 시간 t에 따라 차기 고장 시간을 산출한다.

$$t = -MTBF \times \ln(1 - f(t))$$

Fig. 2의 고장발생 모듈은 고장판단에 따라 고장이 없을 경우 ‘0’을 가지고 구성품의 가동시간이 차기고장시간과 같아지는 시점에서 고장 ‘1’이 발생한다.

작전 시간과 차기고장시간이 같아지는 지점에서 엔진의 고장이 발생하고 ‘1’의 상태를 출력한다. 이후 작전시간과 차기고장시간은 재설정(엔진)이 이루어지고, 다시 새로운 고장 발생의 상황이 작전 시간에 따라서 설정이 된다.

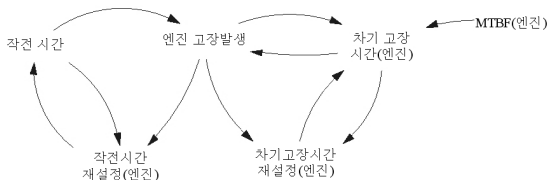


Fig. 2. Failure Module

- 차기고장시간(엔진)
- : IF THEN ELSE(엔진 고장발생=1, -“MTBF(엔진)” × LN(1 - RANDOM UNIFORM(0, 1 , seeds)), 0) - “차기고장시간 재설정(엔진)”
- 고장발생(엔진) : IF THEN ELSE(작전시간>=“차기 고장시간(엔진)”, 1 , 0)
- 작전시간 / 차기고장시간 재설정
- : IF THEN ELSE(엔진 고장발생=1, “작전시간” or “차기고장시간(엔진)”, 0)

엔진의 MTBF가 100일 경우 수리가 정상적으로 이루어지는 상황이라면 Fig. 3과 같이 나타난다. 작전시간과 MTBF가 같아지는 지점에서 고장이 발생한다.

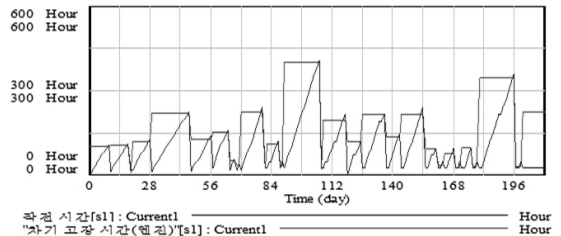


Fig. 3. MTBF Pattern (Engine MTBF=100)

Fig. 4의 정비 과정은 구성품 고장이 발생하면 예비부품을 보유하고 있다면 즉각적으로 수리가 이루어지고 기간은 1일 이내가 된다. 예비부품의 수량이 부족하다면 추가 보급을 받게 되고 1일이 추가적으로 소요된다.

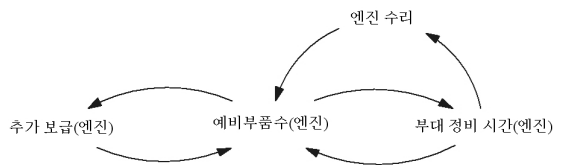


Fig. 4. Repair Module

예비 부품의 수에 따라 부대 정비 시간[IF THEN ELSE(총 엔진 고장수>0, IF THEN ELSE(“예비부품수(엔진)”>=1,1,0), 0)]이 결정된다. 재고량이 있을 경우 즉각 수리가 이루어지고 없을 경우 추가 보급을 받아야 함을 의미한다. 추가 보급을 위해서는 부품별 보급기간이 추가된다. 기타 구성품 관련 제한사항은 없는 것으로 가정한다.

3.1.2 피격발생

전시 항공기 피격 발생 상황은 발생 가능성에 따라 확률적인 값을 적용하였다. Fig. 5와 같이 피격 발생을 난수 Random Uniform(0, 1, seeds)으로 생성을 하고 난수에 따른 범위를 설정하여 피격의 발생 여부를 판단하도록 설정하였다.

작전을 수행하는 항공기들은 독립적으로 피격이 발생하고 피격과 고장이 동시에 발생하지는 않는다. 피격된 항공기는 총 항공기 수에서 제외되고 항공기의 추가 보급은 불가하다. 항공기 피격으로 인한 운용요원 부족에 의한 피해는 없는 것으로 가정한다.

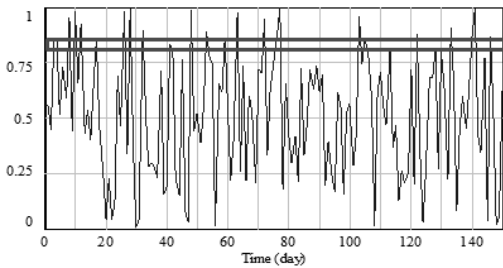


Fig. 5. Crash Rates Module

3.2 시뮬레이션 모델 흐름도

시뮬레이션 모델은 기본 모형에 고장, 수리, 피격 발생 모듈이 추가되어 Fig. 6과 같이 구성된다.

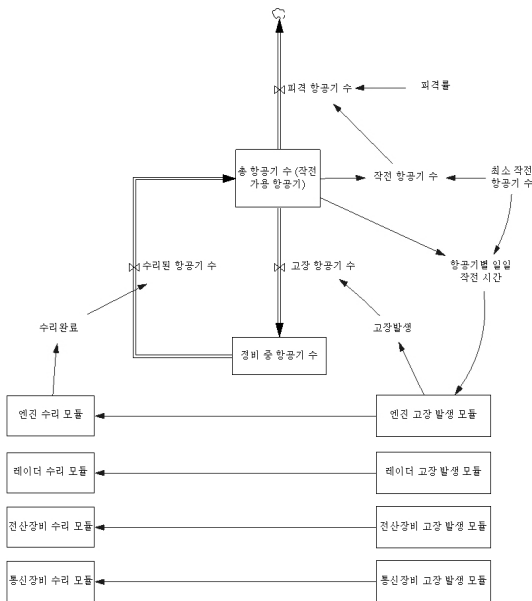


Fig. 6. Simulation Model

3.3 타당성 검토 결과

시스템다이나믹스를 통해 모형을 구축한 이후에는 모형을 이용하여 시뮬레이션을 실시한다. 시뮬레이션 전에는 모형의 타당성을 평가하고 문제가 발생하면 이를 수정하는 절차를 거쳐야 일관성 있는 모형을 구축할 수 있다.

3.3.1 모형의 타당성 평가 목적

시스템다이나믹스 모형의 타당성 검증에 관한 논의는 많이 있었다. Kitching^[10]은 ‘모델 메커니즘이 모델러가 생각하는 방식으로 운영되고 있는지를 검증하는 것’이라고 하고 있으며, Greenberger^[2] 등은 ‘의도된 대로 정확하게 모형의 구성요소들이 잘 합성되었는지에 대한 테스트를 하는 것’이라고 기술하고 있다. Bremer^[1]은 모형의 타당성 평가기준을 모형의 사실유사성, 유용성, 정책관련성 등으로 제시하고 있다.

John Sterman^[25]은 모형의 구조 및 행태 평가, 정책적 시사점 평가를 기준으로 제시하고 있으며, 이를 엄격하게 적용하기 보다는 신축적으로 적용하는 것이 바람직하고 이를 정확하게 구현하지 못하더라도 어느 정도의 유사성을 보인다면 틀린 것이 아니라고 말한다.

John Sterman 모형 검증의 첫째는 모형구조의 평가로 시스템에 대해 우리가 알고 있는 지식이나 자료가 모형의 변수와 일치하는지, 투입된 값을 극단적으로 상정하더라도 상식에 맞는 값을 산출하는지, 문제의 중요 개념들이 모두 포함되어 있는지 등을 종합적으로 파악하여 타당성을 평가한다. 둘째, 모형 행태의 평가는 시스템에서 문제의 현상, 행태의 패턴, 변화, 파동 등이 모형에 그대로 재현되는지, 모형의 가정을 일부 제거했을 때 모형의 행태는 어떤지를 평가하는 것이다.

3.3.2 모형의 타당성 평가 방법

모형의 타당성 평가는 John Sterman이 말한 객관성과 건전성 검증을 중심으로 실시한다.

모형의 객관성 검증이란 모형이 시스템의 본질을 적절하게 표현하였는지에 대한 과정으로 신뢰성을 평가한다. 일반적으로 시뮬레이션의 예측 값과 과거 실적자료를 비교하여 얼마나 유사한 행태를 보이는지에 대한 검증을 실시한다.

유사성을 평가하기 위해서는 오차율을 사용할 수 있다. 과거 실적자료와 예측 값이 완전히 일치한다면 정확도가 높다고 해석할 수 있다. 오차율이 ‘0’에 가까울수록 과거의 실적자료를 정확하게 재생산한다고 할 수 있다. 오차율은 모형구축자의 판단에 달려있으나 일반적으로 15%

미만이면 적합한 것으로 판단한다. 만약 과거의 실적자료가 부족할 경우에는 전문가 집단의 의견이나 사용자 그룹의 의견을 참고하여 결정한다.

모형의 건전성 검증은 모형의 식과 관련된 관계들이 모형구축자의 의도대로 완성이 되었는지를 확인하는 과정이다. Vensim DSS에서는 모형 구조 및 단위 검증(Model and Unit Check)과 민감도 분석(Sensitivity analysis)이 가능한 기능을 제공하고 있으며, 이를 통해 모형의 건전성을 평가할 수 있다.

민감도 분석을 실시하는 이유는 모형의 논리적 구조식이 변수들의 함수와 상수 등으로 구성되기 때문에 변수의 값이 현실적이지 않거나 정확도가 떨어질 경우 발생하는 불확실성을 판단하기 위해서이다. 모형에서 변수와 구조의 변화에 대해 시뮬레이션 결과치가 상당히 크게 반응하면 그 모형은 수치적으로 민감하다고 말한다.

따라서 예측을 위한 독립변수가 불확실성에 의해 변할 때 종속변수의 값이 어떻게 변하는지를 알 수 있다. 독립변수에 무작위 상수 값을 취했을 경우 종속변수에 미치는 영향이 균등하면 모델은 타당하다고 볼 수 있다. Vensim DSS의 민감도 분석 그래프가 발산하지 않으면 타당한 시뮬레이션 모형이라 할 수 있다. 즉, 독립변수의 변화에 대해 종속변수가 실제 타당하게 변하면 그 모형은 실제 현상을 잘 반영하고 있는 것이다.

3.3.3 모형의 타당성 검토 결과

(1) 모형의 객관성 검증

우선 모형의 객관성을 검증한다. 본 연구의 모형과 유사한 과거 실적자료가 부족하여, 수리 모형을 구축하여 비교를 실시한다. 수리 모형은 함수 마코프체인을 이용한 확률 모형으로 시뮬레이션 모형의 주요 고려요소인 고장률, 수리율, 피격률을 확률적 수치로 적용한다.

기본 가정은 총 항공기의 대수는 고장률, 수리율, 피격률에 따라 영향을 받으며, 각각의 요소는 작전 가능한 항공기의 운용률에 영향을 미치게 된다. 항공기별 임무는 동일하며 임무를 수행하는 작전 지역은 상이하게 편성된다. 1일 작전에 필요한 항공기 대수는 일정 수준으로 정해져 있으며 일정 수준을 유지하기 위하여 대기 중인 항공기는 상시 출동 준비 상태를 유지해야 한다.

출동 준비 중인 항공기는 고장 및 피격의 상황이 발생하지 않으며, 작전 중인 항공기만 고장과 피격의 상황이 발생 가능하다. 출동 준비 중인 항공기는 정비 중인 상태일 수도 있으며, 정비 중인 항공기는 출동이 불가능한 상태이므로 고장 항공기로 분류된다.

따라서 수리 모형은 작전 중인 항공기가 임무를 수행하는 과정 속에서 고장률, 수리율, 피격률의 영향을 받는 3차원 형태의 모델로 구성된다. 이 모델은 개별 변수에 따라 항공기의 작전 운용률을 유지할 수 있는 최소 기간을 산출할 수 있으며, 작전 기간 유지를 위한 개별 변수의 수준도 판단할 수 있다.

또한 항공기 운용률의 유지 방안을 제시하여 전시 임무달성을 위한 항공 전력의 소요 분석 방안의 제시가 가능하다.

연구모형 설정을 위해 총 N대의 항공기가 운용 가능하고 K대의 항공기가 항시 작전을 실시한다고 가정한다. 작전을 실시하는 K대의 항공기는 고장률(f_i)과 피격률(d_i)이 독립적으로 발생하며(집단 베르누이 과정), 수리율(r_i)의 형태(기하분포)를 따른다. 작전 중인 K대의 항공기는 고장과 피격이 동시에 발생할 수 있으며, 피격대수와 고장대수의 합은 N대를 넘지 못한다. 피격대수가 N대일 경우 작전은 불가 상태가 된다.

Table 1을 바탕으로 전이확률 다이어그램과 전이확률

Table 1. Indices

Sign	Meaning	Remark
N	Number of Aircrafts	
K	Number of Operation Aircrafts	State(K, D, F)
D	Number of Crash Aircrafts	
F	Number of Failure Aircrafts	
d_i	Crash Rate	($i = 1, 2, 3, \dots, N$)
d_0	Probability of non-crash	($1 - \sum_{i=1}^N d_i$)
f_i	Failure Rate	($i = 1, 2, 3, \dots, N$)
f_0	Probability of non-failure	($1 - \sum_{i=1}^N f_i$)
r_i	Repair Rate	($i = 1, 2, 3, \dots, N$)

행렬은 Fig. 7, Fig. 8과 같이 구성된다. 총 항공기를 4대로 가정한 상태의 구성이며, 작전 항공기의 대수는 2대이다. 총 항공기의 대수(작전 가용 항공기)가 0대이고, 피격 항공기의 대수가 4대가 된다면 작전은 불가 상태가 된다.

피격 항공기 대수가 증가하는 (2,0,0)에서 (2,1,0)으로의 상태 전이는 가능하나 반대는 불가능하다. 피격된 항공기를 대체할 수 있는 방법이 없기 때문이다. (2,0,0)에서 (2,0,2)로의 전이는 작전 항공기 2대의 고장 발생에 따라

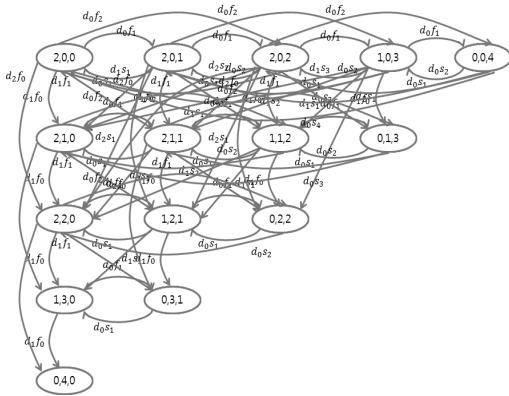


Fig. 7. Transition Diagram

	2.0,0	2.0,1	2.0,2	1.0,3	0,0,4	2.1,0	2.1,1	1.1,2	0.1,3	2.2,0	1.2,1	0.2,2	1.3,0	0.3,1	0.4,0
2.0,0		d_{0f_1}	d_{0f_2}			d_{1f_0}	d_{1f_1}			d_{2f_0}					
2.0,1	d_{0s_1}		d_{0f_2}			d_{1s_1}	d_{1f_0}	d_{1f_1}		d_{2s_1}	d_{2f_0}				
2.0,2	d_{0s_2}	d_{0s_1}		d_{0f_2}		d_{1s_2}	d_{1s_1}	d_{1f_0}	d_{1f_1}	d_{2s_2}	d_{2s_1}	d_{2f_0}			
1.0,3	d_{0s_3}	d_{0s_2}	d_{0s_1}			d_{1s_3}	d_{1s_2}	d_{1s_1}	d_{1f_0}						
0,0,4	d_{0s_4}	d_{0s_3}	d_{0s_2}	d_{0s_1}											
2.1,0							d_{0f_1}	d_{0f_2}		d_{1f_0}	d_{1f_1}		d_{2f_0}		
2.1,1							d_{0s_1}		d_{0f_1}	d_{0f_2}	d_{1s_1}	d_{1f_0}	d_{1f_1}	d_{2s_1}	d_{2f_0}
1.1,2							d_{0s_2}	d_{0s_1}		d_{0f_1}	d_{1s_2}	d_{1s_1}	d_{1f_0}		
0.1,3							d_{0s_3}	d_{0s_2}	d_{0s_1}						
2.2,0											d_{0f_1}	d_{0f_2}	d_{1f_0}	d_{1f_1}	d_{2f_0}
1.2,1											d_{0s_1}		d_{0f_1}	d_{1s_1}	d_{1f_0}
0.2,2											d_{0s_2}	d_{0s_1}			
1.3,0														d_{0f_1}	d_{1f_0}
0.3,1														d_{0s_1}	
0.4,0															

Fig. 8. Transition Matrix

가능하나 (1,0,3)으로의 전이는 불가하다. 작전 항공기 대수인 2대를 초과하여 3대가 고장 발생할 수 없기 때문이다.

	2.0,0	2.0,1	2.0,2	1.0,3	0,0,4	2.1,0	2.1,1	1.1,2	0.1,3	2.2,0	1.2,1	0.2,2	1.3,0	0.3,1	0.4,0
2.0,0		d_{0f_1}	d_{0f_2}			d_{1f_0}	d_{1f_1}			d_{2f_0}					
2.0,1	d_{0s_1}		d_{0f_2}			d_{1s_1}	d_{1f_0}	d_{1f_1}		d_{2s_1}	d_{2f_0}				
2.0,2	d_{0s_2}	d_{0s_1}		d_{0f_2}		d_{1s_2}	d_{1s_1}	d_{1f_0}	d_{1f_1}	d_{2s_2}	d_{2s_1}	d_{2f_0}			
1.0,3	d_{0s_3}	d_{0s_2}	d_{0s_1}			d_{1s_3}	d_{1s_2}	d_{1s_1}	d_{1f_0}						
0,0,4	d_{0s_4}	d_{0s_3}	d_{0s_2}	d_{0s_1}											
2.1,0							d_{0f_1}	d_{0f_2}		d_{1f_0}	d_{1f_1}		d_{2f_0}		
2.1,1							d_{0s_1}		d_{0f_1}	d_{0f_2}	d_{1s_1}	d_{1f_0}	d_{1f_1}	d_{2s_1}	d_{2f_0}
1.1,2							d_{0s_2}	d_{0s_1}		d_{0f_1}	d_{1s_2}	d_{1s_1}	d_{1f_0}		
0.1,3							d_{0s_3}	d_{0s_2}	d_{0s_1}						
2.2,0											d_{0f_1}	d_{0f_2}	d_{1f_0}	d_{1f_1}	d_{2f_0}
1.2,1											d_{0s_1}		d_{0f_1}	d_{1s_1}	d_{1f_0}
0.2,2											d_{0s_2}	d_{0s_1}			
1.3,0														d_{0f_1}	d_{1f_0}
0.3,1														d_{0s_1}	
0.4,0															

Fig. 9. Composition of Absorbing Markov Chain

$$P = \begin{bmatrix} Q & R \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

전이확률 행렬로 이산시간 흡수 마코프체인의 정의에 의해 흡수까지 걸리는 시간과 흡수지점을 판단할 수 있다.

Fig. 9로부터 Q 행렬은 transient 상태들간의 전이행렬을 나타내고, R 행렬은 transient 상태에서 흡수상태로 전이하는 확률의 행렬을 나타낸다. 또한 아랫부분의 0 행렬은 흡수상태에서 transient 상태로 전이하는 확률 0을 나타내고 I 행렬은 단위행렬을 의미한다.

흡수될 때까지 걸리는 시간은 $E = (I - Q)^{-1}$ 이고 흡수 지점은 $A = E \cdot R = (I - Q)^{-1} \cdot R$ 을 통해 구할 수 있다.

이와 같이 수리 모형을 통해 항공기의 운용률과 작전 일수의 분석이 가능하며, 수리 모형과 시물레이션 모형의 분석 결과를 비교하여 객관성을 검증할 수 있다.

Table 2는 고장률 / 수리율 10%, 피격률 1%를 기준으로 수리 모형과 시물레이션 모형을 비교한 결과이다. 작전 지속일은 항시 2대의 항공기가 작전을 수행할 수 있는 기간을 의미하며, 고장률과 피격률은 기타 변수들을 고정한 상태에서 100일 이상의 작전이 가능하기 위한 변수의 적정 수준을 의미한다.

Table 2. Probability Model and Simulation Model

	Probability Model		Simulation Model	
	4Aircrafts	5Aircrafts	4Aircrafts	5Aircrafts
Possible Operation Days	95	132	80	139
Failure Rate	10% ↓	20% ↓	8% ↓	23% ↓ (120 days)
Crash Rate	1% ↓	1.5% ↓	1% ↓	1.5% ↓

일정 운용률의 유지와 작전 일수를 위한 변수의 적정 수준을 판단할 수 있으며, 두 가지 모형의 결과가 거의 유사함을 알 수 있다.

(2) 모형의 건전성 검증

모형의 논리적 관계 검증에 위한 방안으로 수식검증과 단위검증을 실시한다. Vensim DSS 에서 제공하는 기능을 활용하여 함수식과 각 변수간의 관계에 충돌이나 중복 여부 등 구조의 오류를 확인하고, 변수에 입력된 단위를 함수식과 대조하여 단위검증을 실시한다. 프로그램 확인 결과 Fig. 10과 같이 수식검증과 단위검증 모두 이상이 없다고 나타났다.

사용된 자료가 현실적으로 타당하지 않거나 정확도가

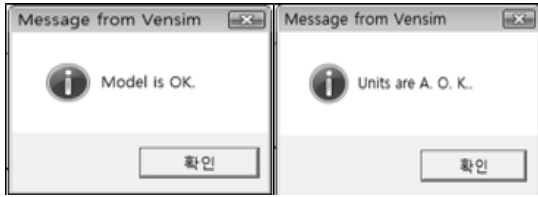


Fig. 10. Model and Unit Check

떨어지면 모델의 수식에 불확실성이 발생한다. 따라서 Vensim DSS 에서는 주요 상수들에 대한 모델의 건전성을 확인할 수 있도록 민감도 분석(Sensitivity Test) 기능을 제공한다. 민감도 분석은 모형에 사용되고 있는 상수들에 대하여 난수를 발생시키는 방법으로 사용자가 임의로 지정한 회수만큼 시뮬레이션을 실행하고 결과를 확인하는 방식으로 진행된다.

본 연구에서는 모형개발에 활용한 Vensim DSS 프로그램의 민감도 분석을 실행하였다. 부품별 MTBF에 대한 총 항공기 수의 변화를 확인하기 위해 부품별 MTBF를 임의균일분포(Random Uniform Distribution)로 최소값과 최대값의 범위를 1%내로 설정하여 200회의 시뮬레이션을 실시하였다. 피격률과 수리율에 관련된 부품별 보급일에 대해서는 고정된 값으로 가정하였다.

민감도 분석을 실시하면 Fig. 11과 같이 총 항공기 수의 그래프 폭이 다소 증가하여 부품별 MTBF에 따라 민감하게 변화됨을 알 수 있다. 그러나 변화의 방향이 일정하며 증가의 폭이 크지 않아서 해석상의 문제는 어렵지 않을 것으로 판단할 수 있다.

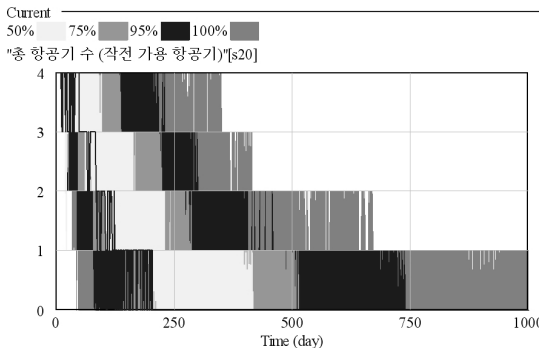


Fig. 11. Sensitivity Test

모형의 객관성과 건전성을 검증한 결과, 요구하는 시스템을 유사하게 구현하고 있음을 알 수 있다.

4. 모형 적용 및 사례 분석

본 장에서는 소요량 산정 모형을 활용하여 전시와 평시의 운용 개념 구별에 따라 항공기 대수별 운용률 분석을 실시한다.

시나리오 설정을 위한 항공기의 운용 개념은 감시체계 운용을 위한 항공기의 작전으로 한정하였으며, 이를 위한 변수들은 유사 기종의 항공기에서 적용 가능한 자료를 수집하여 활용하였다.

전시와 평시의 운용 개념은 항시 작전을 수행하는 항공기의 대수와 피격률의 차이를 고려하여 반영하였다.

항공기의 작전시간은 일일 12시간이며 임무의 특성에 따라 추가적인 운용이 가능하다. 실제 작전을 수행하는 시간을 기준으로 작전을 구분하며, 비행 준비시간, 이·착륙시간, 작전지역 이동시간은 미고려 하였다. 기타 항공기 운용과 관련된 체계요소에는 제한사항이 없는 것으로 하였다.

피격률에 관련된 자료는 국내 관련 자료가 부족하여 외국군의 사례를 참조하였다¹¹⁾. 피격률은 항공기 1회 비행시 피격을 당할 확률로 공중우세를 확보한 전투를 중심으로 판단이 되었으며, 다수의 항공기 운용은 공중우세를 확보한 상태에서 운용이 가능할 것으로 판단하여 본 자료를 적용하였다. 항공기의 피격이 발생한 이후에는 대체가 불가능하다. 피격과 관련된 인적 손실과 피해는 미고려하였다.

CASE 1) 전시 항공기 대수별 운용률 분석

전시에는 주·야간 24시간을 총 4~8대의 항공기를 보유한 비행단에서 작전지역을 감시하는 임무를 수행하는 것으로 가정한다. 이때 항시 작전을 수행해야 하는 항공기는 2대이며, 2대 미만이 될 경우에는 작전 제한으로 판단한다.

주요 변수별 변화에 따른 운용률과 작전 지속일을 분석하여 소요량을 산정한다. 주요 변수는 군에서 운용중인 항공기의 자료를 수정 및 가정하여 고장률과 수리율에 반영한다. 고장률과 관련된 주요 부품은 엔진, 레이더, 전산장비, 통신장비의 4가지로 한정하였으며, 기타 부품의 영향은 없는 것으로 가정한다.

부품별 MTBF를 고려한 고장률은 15% 수준을 기준으로 설정하였다. 엔진 MTBF(= 125 hr), 레이더 MTBF(= 145 hr), 전산장비 MTBF(= 44 hr), 통신장비 MTBF(= 80 hr)으로 설정하여 전체 고장률이 15%가 되며 수리율

12.5%를 유지하도록 설정하였다[전시 피격률 1.5%].

난수 seed 1,000개를 생성하여 시나리오별로 적용하였으며 회귀 분석을 실시하였다. 작전 지속일은 2대의 항공기가 항시 작전이 가능한 상태를 의미한다.

Table 3과 같이 보유 항공기의 대수가 증가하면 작전 지속일이 증가한다. 전시 안정된 작전을 수행하기 위해서는 항공기의 대수 증가가 필요함을 의미하며, 200일 이상의 작전이 가능하기 위해서는 8대의 항공기를 보유해야 한다.

Table 3. Possible Operation Days on Wartime

Number of Aircrafts	4	5	6	7	8
Possible Operation Days	40	81	134	189	243
R^2	0.8667	0.8766	0.8848	0.8942	0.9009

동일 조건에서 작전 지속일에 따른 항공기 운용률을 판단하면 적정 소요량과 작전의 융통성을 판단할 수 있다.

4대의 경우 50%이상의 가동률을 유지하고, 8대의 경우 25%의 가동률을 유지한다면 작전 수행에 제한사항이 없게 된다.

Table 4에서는 전시 일정 피격 상황에서 작전 지속일에 따른 적정 운용률 유지를 위한 항공기 대수 판단의 기준을 제시하고 있다.

Table 4. Operation Rates (%)

Aircrafts	Possible Operation Days			
	50	100	150	200
4	48.95	27.7	17.05	10.53
5	56.36	33.72	20.24	12.3
6	67.11	44.73	27.41	16.61
7	72.34	52.76	35.87	22.1
8	77.01	59.04	43.26	29.41

전시 70%이상의 운용률 유지를 위해서는 7~8대 항공기를 보유해야 한다.

CASE II) 평시 항공기 대수별 운용률 분석

평시에는 임무의 특성상 작전 항공기가 1대 운용되게 된다. 전시와 동일하게 총 항공기는 4~8대를 보유할 경우로 한정하며, 피격률은 평시 1%로 가정하여 분석한다. 기타 가정사항은 전시 상황과 동일하다[고장률 15%, 수

Table 5. Possible Operation Days on Peacetime

Number of Aircrafts	4	5	6	7	8
Possible Operation Days	322	445	580	726	789
Scheduled Repair	296	408	531	665	723
R^2	0.992	0.9965	0.9981	0.9988	0.9983

리율 12.5%].

변수 변화에 따른 작전 지속일의 경우 전시보다는 일수가 크게 증가된다. 평시에는 작전 지속일의 경우 전시 대비 약 280~550일 정도 증가되는 것을 확인할 수 있다. 작전 항공기의 대수가 1대라는 것과 피격률의 차이로 인해 작전 지속일이 증가한다.

Table 5와 같이 평시에는 계획 정비(창정비)를 고려하여 소요를 판단해야 한다. 고정된 고장률과 수리율을 가지게 된다면, 계획 정비를 고려하여 500일의 작전 지속을 위해서는 6대 이상 보유시 적정 운용률 유지가 가능하다.

5. 결론 및 향후 연구방향

적의 의도를 사전에 인지하여 기습에 대비하고 공격한 적을 무력화시키기 위한 군의 전력 강화 중요성이 증가하고 있으며, 세계 각국은 전력 향상을 위해 노력하고 있다. 특히, 현대 전장과 북한의 위협 양상을 고려한다면 다양한 전력의 보유와 향상은 매우 중요한 의미를 가진다. 그 중에 공군의 항공기는 전력의 핵심이며 정책적·경제적 효율성도 크다.

따라서 군용 항공기의 운용 개념에 따른 적정 소요량 산출 연구는 군의 정책적 구상과 경제적 효율성에 영향을 줄 수 있다.

본 연구에서는 시스템다이내믹스를 통한 군용 항공기의 적정 전력수준을 분석하는 현실적 모형을 제시하고자 하였다. 전·평시로 구분하여 운용 대수에 따른 변수의 변화와 개별 변수에 따른 운용률 분석으로 적정 대수 산출 방법을 제시하였으며, 향후 관련사업 추진시 필요한 연구 결과로 판단할 수 있다.

본 연구의 향후 연구방향은 아래와 같다.

첫째, 본 연구의 결과를 활용하여 작전운용성 보완과 성능개량요소를 추가로 반영하여 적정 대수와 운용률을 산정할 수 있을 것이다. 각 군의 전력수준에 따른 상호 보완 방안을 마련한다면 현재 작전 소요를 줄이면서 작전운용성은 향상될 수 있다. 또한 기술개발을 통한 성능 개량

으로 고장률을 줄이고 수리율을 원하는 수준으로 유지하게 된다면 군에서 요구하는 적정 운용률을 유지할 수 있다. 또한 항공기 도입시 필요한 막대한 예산을 절감하는 경제적 효과를 증가시킬 수 있다.

둘째, 미래의 작전환경과 필요성에 따라 적정 도입시기를 분석할 수 있다. 항공기의 수명주기 도래시 운영기준을 정립하여 사전에 항공기를 추가로 확보 할 수 있는 방안을 마련할 수 있다. 항공기의 예상 수명은 비행시간에 따라 달라지므로 향후 추가 도입시기는 작전환경을 기준으로 수명주기, 생산소요기간을 고려하여 판단 할 수 있을 것이다.

References

1. Bremer. Stuart A, The GLOBUS model : Computer simulation of Worldwide Political and Economic Developments. Boulder, Co: Westview, 1987.
2. Greenberger, M, Crenson, M.A, and Cressey, Models in the Policy process. New York: Russell Sage Foundation, 1976.
3. Hui Li and Tao Yang, "Queues with a variable number of servers", European Journal of Operational Research, Vol.124 No.3, 2000.
4. Joseph J. Moder and Cecil R. Phillips. Jr, "Queueing with fixed and variable channels", Operation Research, Vol.10 No.2, 1961.
5. Kang, Y.S., Back, J.O., Lee, G.O., Reliability Engineering, Dong-hwa Tec, 2002.
6. Kim, G.I., Yoon, H.D., Lee, S.G., Lee, S.W., Jung, D.Y., Jung, B.G., Choi, S.H., Tae, W.S., Weapon Systems, CheongMoonGak, 2013.
7. Kim, H.C., Choi, S.C., "A Study of the Optimized Requirement Estimation of K-1 Tank Repair Parts", Military Operations Research Society of Korea, vol.26 No.2, 2000.
8. Kim, K.C., SYSTEM DYNAMICS using Vensim, BizSeoul, 2007.
9. Kim, y., Analysis on the Determination of Machine Repair Problem Maintenance Floats with Divided Repair Time through Absorbing Markov Chain, Diss, Korea National Defense University, 2008.
10. Kitching R. L, Systems Ecology: An Introduction to Ecological Modelling. University of Queensland press, 1983.
11. Korea Air Force, Lessons of the Gulf War, Korea Air Force, 1992.
12. Lee, H.U., Queueing Theory, sigma press, 2006.
13. Lee, J.S., A Study on the Proper Requirement Assessment of the UAV in the Army Corps Level, Diss, Korea National Defense University, 2008.
14. Lee, Y.U., Tang, H., Lee, T.S., "A Study on the Optimal Number of Emergency Vehicles for Development of Pre-hospital Emergency Medical System", Korea Institute of Industrial Engineers, 2010.
15. Lim, J.D., Analysis of the Operational Effect of the UAV in the Army Corps Level Using D_MAP, Diss, Korea National Defense University, 2009.
16. Lim, J.S., MATLAB 7, NOPIGIPI, 2008.
17. Park, S.H., Moon, S.A., "A Study on the Simulation about Operation Availability under Maintenance Capacity and Repair Part", Korea System Dynamics Society, vol.11 No.2, 2010.
18. Pack, J.G., A Study on the Decision of Aircraft Demand for Air to Surface Mission, Diss, Korea National Defense University, 1996.
19. Rander, J, Guidelines for Model Conceptualization: Elements of the System Dynamics Method. Massachusetts: The MIT Press, 1980.
20. R.O.K Joint Chiefs of Staff, GULF War, R.O.K Joint Chiefs of Staff, 1992.
21. Son, H.M., Yoon, B.G., Optimal Level of Maintenance Float with Different Control Policies Depending on the Operation Availability, Diss, Korea National Defense University, 2008.
22. Son, Y.S., A Model to Evaluate the Aircraft Requirement with Discrete-Time Absorbing Markov Chain, Diss, Korea National Defense University, 2012.
23. Song, C.H., A Study on the Optimal Allocation of Aircrafts to Closed Air Support By Goal Programming, Diss, Korea National Defense University, 2004.
24. Srinivas, R. C. and J. K. Daniel, "A Markovian inventory system with random shelf time and back orders", Kettering University, 2004.
25. Sterman, J. D, Business Dynamics : Systems Thinking and Modeling for Complex World. MacGraw-Hill Company, 2000.



이 문 걸 (mglee@mnd.mil)

2004 공군사관학교 운영분석 석사
2004 미 해군대학원 운영분석 석사
2009 서울대학교 산업공학 박사
2013~현재 국방대학교 군사운영분석 전공 교수

관심분야 : 최적화, 시뮬레이션, 시험평가 / 비용분석



김 상 민 (sangminkim81@naver.com)

2014 국방대학교 군사운영분석 석사과정

관심분야 : 최적화, 시뮬레이션