

최적 예방정비주기 설정을 위한 무기체계 모델링 기법

이 승상¹ 지 웅기² 김 성환^{3†}

내용목차

1. 서론
2. 이론적 고찰
3. 일반화 모델 설계
4. 사례적용
5. 결론

1 LIG넥스원 ILS연구센터 연구원

2 LIG넥스원 ILS연구센터 선임연구원

3[†] LIG넥스원 ILS연구센터 선임연구원

(교신저자 Tel:010-5710-1208 E-mail: Shkim72@lignex1.com)

논문접수일: 2011년 4월 22일 게재확정일:2011년 6월 27일

논문수정일 (1차: 2011년 6월 18일 , 2차: 2011년 6월 27일)

A Modeling Method of Weapon Systems for Optimal Preventive Maintenance Interval

Lee, Seung Sang¹ Ji, Woong Ki² Kim, Sung Hwan^{3†}

Abstract

The study of optimal preventive maintenance interval is an important topic primarily because it is an efficient way to maximize operational availability of a weapon system using only small resources. A study of this kind is handled by using simulation methods. In this paper, we propose a modeling method of weapon systems that may be used for optimal preventive maintenance interval and analyzed optimal alternatives.

The Modeling and Simulation (M&S) method is quite useful compared with the mathematical approach, since M&S is a stochastic analysis. It considers the randomness of the failure rate, repair time and operation schedule. Using this method, therefore, allows us to achieve more reliable results from other mathematical approaches.

First, we analyze the mathematical approach using the existing papers. Second, we introduce a model, called the General Model, which reflects the operational concept and maintenance policies of a general weapon system. It may be customized to fit specific systems. Third, we present a specific case using UAV (Unmanned Aerial Vehicle) system, and customize that model. Finally, we arrive at an optimal solution by simulating that model.

<Key Word> Operational Availability, Preventive Maintenance, Corrective Maintenance, M&S, Simulation Method

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

현대전은 네트워크 중심전(NCW: Network Centric Warfare)으로 변화하고 있으며, 무기체계는 더욱 첨단화·복잡화되고 있는 추세이다. 이에 따라 근래의 무기체계는 획득하는 것 뿐 아니라 효과적인 운용유지의 중요성도 강조되고 있다.

무기체계의 지속적인 운용을 위한 중요한 요소중 하나는 정기적인 정비활동이다. 적절한 주기의 정비활동은 무기체계의 고장을 사전에 예방하고 가용도를 높여 전투준비능력을 높일 수 있다.

무기체계의 효율적인 운영을 위한 정비주기 산출은 운용개념, 정비정책, 고장률, 수리부속재고 등의 요소를 복합적으로 고려해야 한다. 이 때 수학적 방법으로 관련된 요소를 고려하여 산출하는 것은 어려우며, 일반적으로 경험제원에 따라 정비주기를 설정하여 정비주기를 정하고 있다. 그러나 경험제원에 따른 정비주기의 산출은 무기체계의 다양화로 인해 적용하기 어려운 경우가 많고, 신개념의 무기체계의 경우에는 참고할 대상이 없는 경우도 있다. 이에 따라, 새로운 분석 방법의 필요성이 대두 되고 있다.

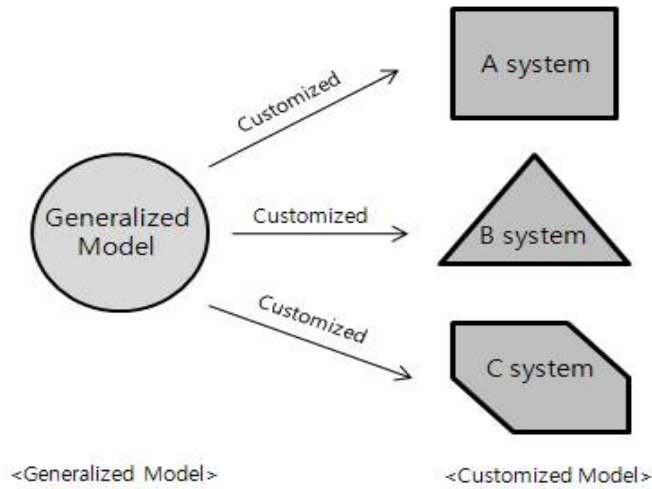
위와 같이 복잡한 문제의 해결 방법으로 시뮬레이션 기법은 유용한 도구가 될 수 있다. 시뮬레이션 기법을 활용하면 적은 비용으로 복잡한 무기체계의 모델링이 가능하며 이를 바탕으로 짧은 기간 동안 많은 대안을 분석할 수 있다. 그리고 확률적(Stochastic) 분석이 가능하여, 무작위성(Randomness)이 반영된 현실세계와 유사한 모델을 만들 수 있고, 분석 결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있다. 이러한 특성으로 시뮬레이션 기법은 수학적 모형이나 경험제원 분석의 한계점을 일정 부분 극복할 수 있다.

본 연구에서는 최적의 예방정비주기를 설정을 위해 시뮬레이션 기법을 이용하는 방법을 제시한다.

1.2 연구범위 및 개요

무기체계의 예방정비주기 설정 모델은 무기체계가 갖는 고유의 특성과 운용개념, 소요군의 정비정책 등을 복합적으로 고려해서 개발되어야 한다. 따라서 모든 무기체계에 적용 가능한 모델은 만들기 쉽지 않다.

본 연구는 일반화 모델을 설계하고 이를 확장하는 두 단계로 진행한다. 일반화 모델은 무기체계의 운용 및 정비 과정을 단순화하여 모든 무기체계에 적용이 가능하도록 유연한 구조로 설계한다. 그리고 일반화 모델을 각 무기체계의 특성에 맞게 확장하여 최적의 예방정비주기를 설정하는 기법을 소개한다.



<그림 5> 모델 설계 과정

1장에서는 연구의 목적 및 개요, 2장에서는 기존의 연구사례 연구를 통한 이론적 고찰, 3장에서는 일반화 모델 설계 및 검증, 4장에서는 일반화 모델을 확장하여 특정 무기 체계에 적용하는 사례를 제시, 5장에서는 연구의 최종 결론과 향후 발전방향을 제시한다.

2. 이론적 고찰

2.1 기존 연구

1) 최적 예방정비주기 산출 모형

예방정비주기의 최적화 문제는 제약조건 선정이 중요하다. 제약조건은 크게 정비활동의 비용과 시스템의 성능으로 분류할 수 있다.

비용을 제약조건으로 분석한 연구로는 1960년 Barlow & Hunter[6] 외가 처음으로 시간당 비용을 최소화하는 예방정비주기 산출에 대한 모형을 제시하였다. 또한, Juang & Anderson[9] 외는 비용을 최소화하는 최적의 부품교체 주기를 설정하는 연구를 수행하였다.

시스템의 성능을 제약조건으로 선정한 기존 연구로는 Kardon & Fredendall[10] 외는 특정 경우에는 정비비용 보다 시스템의 신뢰도를 우선적으로 고려하여 예방정비주기를 산출하는 것을 제시하였고, Wang[11]은 일정 수준의 시스템 성능을 만족하는 조건에서 비용이 최소가 되도록 하는 것을 강조하였다.

무기체계의 정비주기는 경제적인 부분만 고려할 수 없으며 일정 수준의 가용도를 충족해야 함은 분명하다. 시스템의 성능을 우선으로 고려하고 그 가운데 비용이 최소화 되어야 한다고 판단된다. 즉, 무기체계의 운용가용도의 제약 하에 정비 비용의 최소화 문제로 정의할 수 있다.

2) 무기체계의 운용가용도 시뮬레이션

박상근[3]은 해군 함대 수리창에서 함대의 운용가용도에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 주요 영향요인으로 정비인력과 수리부속재고를 선정하였고, 영향요인에 따른 운용가용도의 변화를 살펴보았다. 또한 박세훈[4] 외는 정비능력과 예비부품수량의 제약 하에 운용가용도를 분석하였다.

위의 연구들은 정비 자원(Resource)과 운용가용도의 관계에 초점을 두었다면 본 연구는 정비주기와 운용가용도의 관계에 대한 논의를 하고자 한다.

2.2 국내 예방정비주기 설정 현황

무기체계 개발 시 예방정비주기 설정은 유사무기체계의 자료를 근거로 설정하거나 각 군의 규정에 의해 설정되고 있다.

예를 들어, XX레이더의 예방정비주기 설정 시 XX레이더와 유사체계인 YY레이더의 예방정비주기를 참고하는 것이 첫 번째 방법이다. 한계점은 유사한 하드웨어 구성과 운용개념을 가지고 있다 하더라도 XX레이더와 YY레이더는 분명한 차이점이 존재하고, 이 차이점이 반영되지 못한다면 XX레이더만의 최적 예방정비주기가 될 수 없다는 점이다. 유사무기체계를 이용하는 방법의 또 다른 한계점은 유사체계가 없는 신규 무기체계 개발 시에 적용하기 어렵다는 점이다.

각 군의 규정을 따른 예방정비주기 설정의 방법은 <표 1>과 같은 각 군의 규정을 참고하는 방법이다. 이 방법은 규정에서 제시한 주기가 포괄적으로 제시되어 있다는 점이다. 같은 종류의 무기체계라도 규모, 운용개념, 정비 정책 등에서 차이가 있을 수 있으며, 보다 정확한 주기 설정을 위해서는 별도의 분석이 필요하다.

<표 1> 규정화된 예방정비주기 설정 예시[5]

구분	장비	주기	기간
야전정비	잠수함	X개월 운용 후	XX일
	잠수정	X개월 운용 후 연 X회	XX일
중간창정비	잠수함	매 X년	XX일
	잠수정	매 X.X년	XX일

2.3 기초이론

1) 신뢰도(Reliability)

신뢰도($R(t)$)는 어떤 체계가 주어진 조건하에서 일정기간 동안 의도된 기능을 수행할 수 있는 확률이다.[13] 신뢰도는 무기체계에 대한 정량적인 평가를 할 수 있는 기준이 되며, 무기체계의 가용도를 결정하는 주요한 요소가 된다.

일반적으로 전자부품으로 구성된 복잡한 무기체계의 고장은 우발적으로 발생하는 경향을 가지며, t 시간이 경과했을 때, 무기체계의 신뢰도는 수식으로 표현하면 수식 (1)과 같다.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

λ : 시스템의 고장률
 t : 시간

무기체계의 신뢰도 척도는 고장 간 평균시간(MTBF: Mean Time Between Failure)으로 나타내기도 하며, 이는 고장률(λ)의 역수로 표현된다.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

2) 운용가용도(Operational Availability)

운용가용도(A_o)는 고장정비시간, 예방정비시간, 행정지연시간, 군수지연시간을 고려한 값으로 장비가 정비를 거쳐 임의의 시점에서 가동상태에 있을 확률을 의미한다.[2] 운용가용도를 구하는 일반적인 계산식은 수식 (3)과 같다.

$$A_o = \frac{TUT}{TUT + TDT} \quad (3)$$

TUT : 총가동시간 (Total Up Time)

TDT : 총불가동시간 (Total Down Time)

총불가동시간은 총정비시간과 총행정/군수지연시간을 합친 시간으로 장비가 실제로 운용 불가능한 모든 상태의 시간이다. 수식 (3)을 시뮬레이션에서는 수식 (4)로 변경하여 계산한다.

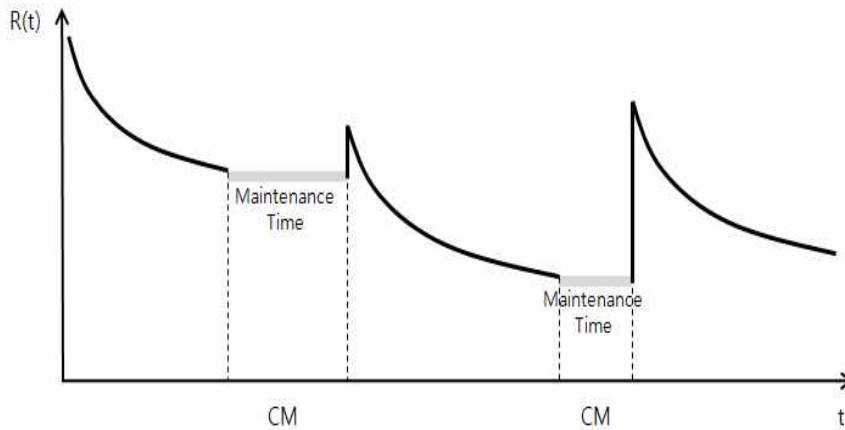
$$A_o = \frac{\text{운용 가능 상태시간}}{\text{총 시뮬레이션시간}} \quad (4)$$

3) 정비활동과 신뢰도의 관계

MIL-STD-1388-2B에서 정의하는 일반적인 정비 활동의 종류는 총 18가지(접근, 조정, 제거, 수리 등)이다.[7] 이 중에서 주유 및 조정 같은 정비 활동은 무기체계의 신뢰도와의 수학적 관계를 설명하기 어렵다. 본 연구에서는 이를 제외한 정비활동에 대하여 다음과 같이 2가지로 분류하고자 한다.

(1) 고장정비 (CM: Corrective Maintenance)

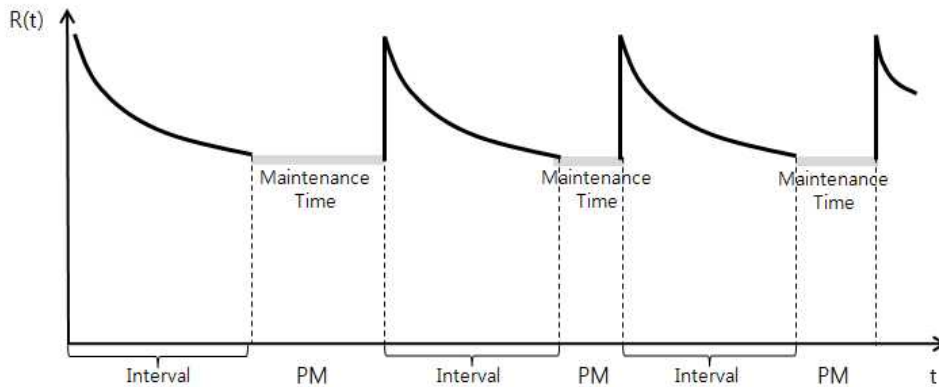
제거, 교환, 수리 등의 정비 활동이 이에 해당 된다. 시스템에 고장이 발생한 다음 수행되는 사후정비이고, 고장이 발생한 부품만을 새 제품으로 교환(또는 수리)하여 시스템의 신뢰도를 부분적으로 회복하는 행위이다. 시스템의 고장이 지수분포를 따를 경우, 그래프로 나타내면 <그림 2>와 같다.[1]



<그림 6> 고장정비와 시스템 신뢰도의 관계

(2) 예방정비 (PM: Preventive Maintenance)

완전 분해 수리의 정비 활동이 이에 해당된다. 시스템의 고장을 미연에 방지하기 위해 수행하는 사전정비이고, 시스템의 신뢰도를 완전히 회복하는 행위이다. 시스템의 고장이 지수분포를 따를 경우, 그래프로 나타내면 <그림 3>과 같다.[1]



<그림 7> 예방정비와 시스템 신뢰도의 관계

3. 일반화 모델 설계

일반화 모델은 본 연구에서 제시하는 모델링 기법의 기본 구조에 해당된다.

3.1 문제정의

모델을 일반화시키기 위해 시나리오를 정의한다. 시나리오는 다양한 무기체계의 운용 개념과 정비개념 중 공통적인 부분만을 고려하여 모델의 확장성과 유연성을 갖도록 정의한 것이다. 일반화 모델의 시나리오는 다음과 같다.

“총 x 개의 Sub-system으로 구성되어 있는 OO체계는 하루에 O_T 시간 운용하고, S_T 시간만큼 대기한다. OO체계의 MTBF는 R_T 시간이다. 고장 발생 시 즉시 정비를 수행하고, 고장 부품만 정비한다. 고장정비 시 CM_T 시간, 예방정비 시 PM_T 시간이 소요된다. 정비가 완료되면 계획된 스케줄에 따라 운용하거나 대기한다. 예방정비주기 시점이 도래하게 되면, 즉시 예방정비를 수행한다. 정비에 필요한 자원(인력, 수리부속, 정비장비 등)은 무한하다.”

이 시나리오는 동적(Dynamic), 이산(Discrete), 확률적(Stochastic) 시뮬레이션에 속한다. 시간의 흐름이 존재하고, 시스템을 독립된 하나의 개체(Entity)로 보고 있으며, 무작위성이 반영되어 있다. 또한, 무기체계의 프로세스(Process)보다는 성능(Performance)에 초점을 맞추고 있다.

3.2 가정사항

모델의 가정사항은 다음과 같다.

- 고장은 지수분포를 따른다. (시스템의 신뢰도는 망각성질을 적용받는다.)
- 고장은 동시에 일어나지 않고, 하나의 고장은 다른 고장에 영향이 없다.
- 발생한 모든 고장은 탐지 가능하고, 탐지된 모든 고장은 수리 가능하다.
- 고장정비 후 시스템의 신뢰도는 부분 회복한다.
- 예방정비 후 시스템의 신뢰도는 완전 회복한다.

3.3 입력자료 및 출력자료

1) 입력자료

<표 2>은 시나리오 기반 최소한의 입력요소(Input Factor)이다.

<표 2> 모델 입력 자료

구분	입력값	비고
시스템 MTBF	R_T (시간)	Distribution
LRU MTBF	-	Matrix(x low)
고장정비시간	CM_T (시간)	Distribution
예방정비시간	PM_T (시간)	Distribution
1일 운용시간	O_T (시간)	Constant
1일 대기시간	S_T (시간)	Constant
정비장소 이동시간	T_T (시간)	Constant

- 시스템 MTBF : 시스템에 고장이 발생하는 시간 간격이다.
- LRU MTBF : 시스템을 구성하는 하부 장비 각각의 MTBF이다. 1차 배열(Matrix)로 만들어져 있고, x 개의 행을 가지고 있다.
- 고장정비시간 : 고장정비 시 걸리는 시간이다.
- 예방정비시간 : 예방정비 시 걸리는 시간이다.
- 1일 운용/대기시간 : OMS/MP(운용형태 요약 및 임무유형)를 기반으로 도출된 운용 및 대기시간이다.
- 정비장소 이동시간 : 운용장소에서 정비장소로 이동하는데 걸리는 시간이다.

2) 출력자료

<표 3>은 모델을 통해 확인할 수 있는 출력자료이다.

<표 3> 모델 출력 자료

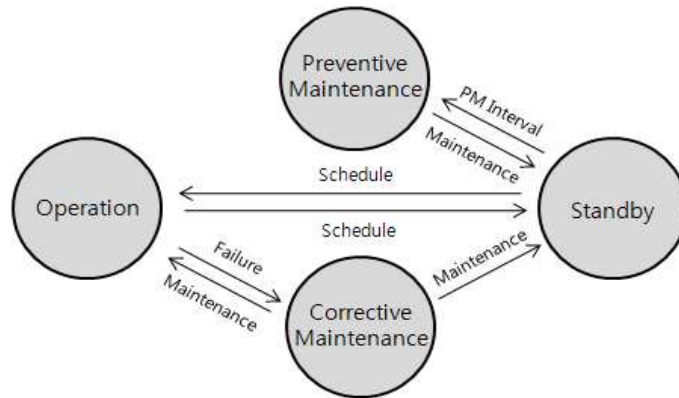
구분	출력값	비고
운용가용도	A_o	실시간 정보 수집

- 운용가용도 : 수식 (4)에 의해 계산 되는 시스템의 실시간 운용가용도이다. 최적 예방정비주기 산출의 제약조건으로 이용된다.

3.4 모델설계

1) 시스템 상태 정의

먼저 시스템의 상태를 정의 하고, 시스템이 각 상태에 점유되는 시간을 통계적으로 수집하여 운용가용도를 계산할 수 있다. 앞서 언급한 시나리오에 따라 상태를 정의하면 <그림 4>과 같이 크게 4가지 상태를 가진다.



<그림 8> 시스템 상태 정의

2) 속성(Attribute) 및 변수(Variable)

<표 3>과 같이 시스템을 제어할 속성과 변수를 설정하였다. 설정된 속성 및 변수 중 주요한 내용을 살펴보면 다음과 같다.

(1) Att_LRU

고장이 발생한 시스템에서 고장 부품을 식별하기 위해 사용되는 속성이다. 시스템의 고장율과 각 부품의 고장율을 이용하여 설정할 수 있다. 예를 들어, 부품 A의 고장 확률은 부품 A가 시스템에서 차지하는 고장율 비율이 되는 것이다.

<표 4> 속성 및 변수

구분	이름	설명
속성	Att_LRU	어떤 부품이 고장인지 식별
변수	Var_SysMTBF	시스템 MTBF
	Var_FailTime	시스템이 고장날 시간
	Var_StandbyTime	"대기"상태에 점유하는 시간
	Var_OperTime	"운영"상태에 점유하는 시간
	Var_StandbyCount	시스템의 운용된 횟수
	Var_PM	예방정비주기
	Var_PMTime	예방정비시간
	Var_CMTime	고장정비시간
	Var_Availability	목표 가용도
	Var_State	시스템의 상태
	Var_Bumper	상태 변환 이동시간 (운영 ↔ 정비)
	Var_FailPortion	부품별 고장률 비율 정보

(2) Var_FailTime

시뮬레이션이 처음 시작 되면 가장 먼저 시스템의 고장 발생 시간을 예약한다. ‘운용’ 상태에 있던 시스템은 현재시간과 고장예약시간을 계속 비교하다가 2개의 시간이 동일해질 때 고장 이벤트를 발생시킨다.

(3) Var_StandbyTime & Var_OperTime

이 2개의 변수는 스케줄을 의미한다. 지정된 시간만큼 ‘운용’상태와 ‘대기’상태를 이동하게 된다.

(4) Var_PM

예방정비주기를 입력하는 부분이다. 여러 가지 값들을 넣어 각 대안들을 분석하고 최적의 대안을 도출하기 위해 사용한다.

(5) Var_State

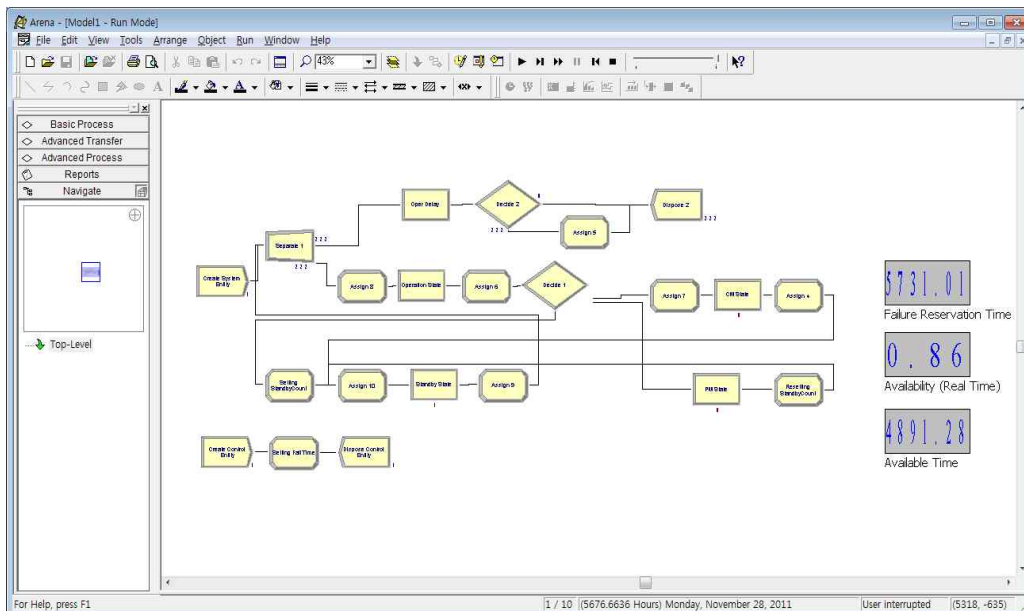
현재 시스템이 어떤 상태인지를 표시하는 변수이다. 모델의 디버그(Debug)를 위해 필요한 변수이다.

(6) Var_FailPortion

부품의 고장률 정보를 담고 있다. 1차 배열로 구성 되어 있으며, 이 변수를 통해 고장 발생 시 해당 부품을 식별할 수 있다.

3) 모델 설계

ARENA를 이용한 모델 설계 방법을 제시한다. ‘일반화 모델’ 설계의 중점사항은 모델의 경량화/단순화 이다.



<그림 9> ARENA로 구현된 일반화 모델

(1) 설계 방법

먼저 하나의 시스템은 하나의 Entity로 설정한다. 이 Entity는 시뮬레이션 시작과 동시에 생성되어 각 상태를 점유한다.

그 후 앞서 정의된 상태를 구현한다. 먼저 “Hold 모듈”을 이용하여 ‘운용’상태를 표현한다. “Hold 모듈”의 “Infinite Hold - Scan for condition” 옵션을 이용하면 모델 내에 변수를 실시간으로 모니터링할 수 있고, 제어로직에 의해 Entity를 이동시킬 수 있다. 제어로직은 모듈로 표현되지 않고 앞서 정의된 속성 및 변수에 의해 구동된다. 그 외의 상태는 “Process 모듈”을 이용한다. “Process 모듈”을 이용하면 정비활동의 모사가 간단해진다. 주어진 자원(정비인력, 지원장비 등)을 입력 하기가 수월해지기 때문이다.

모델의 광역 변수는 모델 전체에서 이루어지는 일련의 과정을 모니터링하고, 필요한 기록을 수행하며 통계적으로 자료를 수집하여 최종 결과에 반영한다. 이 모든 과정은 실시간으로 이루어지고, 사용자는 원하는 변수를 모니터링 함으로써 모델의 실시간 변화를 파악할 수 있다.

추후 “Submodel”을 이용하여 각 상태를 구체화 할 수 있다. Entity는 속성 및 변수에 의해 제어되기 때문에 구체적인 프로세스를 추가하더라도 모델의 구조를 변경할 필요가 없다. 예를 들어, 복잡한 운용개념을 가진 무기체계일 경우 “운용 Hold 모듈” 부분을 구체화하면 되고, 보급, 인력의 개념이 추가 될 경우 “정비 Process 모듈”의 “Resource”를 조정하면 된다. 모델의 우측 부분에는 ‘시스템의 고장 예약시간’, ‘실시간 운용가용도’, ‘실제 운용된 시간’이 표시된다.

(2) 제어 로직

시스템을 의미하는 Entity는 각 상태에서 대기하다가, 특정 조건을 만족하게 되면 그 상태를 벗어나 다른 상태가 된다. 그 조건은 <표 5>와 같고, 앞서 정의한 속성 혹은 변수에 의해 구현된다.

ARENA에서는 시뮬레이션이 반복될 때마다 시드(Seed)를 통해 난수를 발생시키기 때문에 모델에 무작위성(Randomness)을 반영할 수 있게 된다.

<표 5> 시스템 상태변환 조건

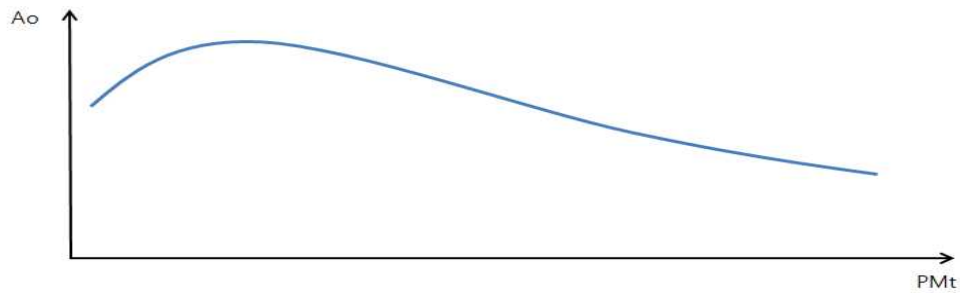
구분	~에서	~으로	조건
1	운용	고장정비	고장이벤트 발생
2	운용	대기	스케줄에 의한 대기
3	예방정비	대기	예방정비 완료
4	고장정비	운용	고장정비 완료
5	고장정비	대기	고장정비 완료
6	대기	예방정비	예방정비주기 도래
7	대기	운용	스케줄에 의한 운용

1

3.5 설계 검증

설계 검증은 예방정비주기와 운용가용도의 상관관계 결과를 예상하고, 분석결과와 비교하는 것으로 확인할 수 있다.

예방정비주기와 운용가용도의 그래프를 예상해보면, 운용가용도는 예방정비주기가 길어짐에 따라 일정시점까지 상승하다가 최고점에 도달한 후 서서히 감소할 것이다. 그 이유는 예방정비주기가 너무 짧을 경우 과도한 예방정비 수행으로 무기체계의 운용시간보다 정비시간이 커지게 되기 때문에 운용가용도가 감소하게 되는 것이고, 반대로 예방정비주기가 너무 길 경우 고장 발생이 잦아지기 때문에 운용가용도가 점차 감소한다. 결국 운용가용도의 최적값은 고장정비와 예방정비가 적절히 조합되었을 때이다. 이러한 경향성을 그래프로 표현하면 <그림 6>과 같다.



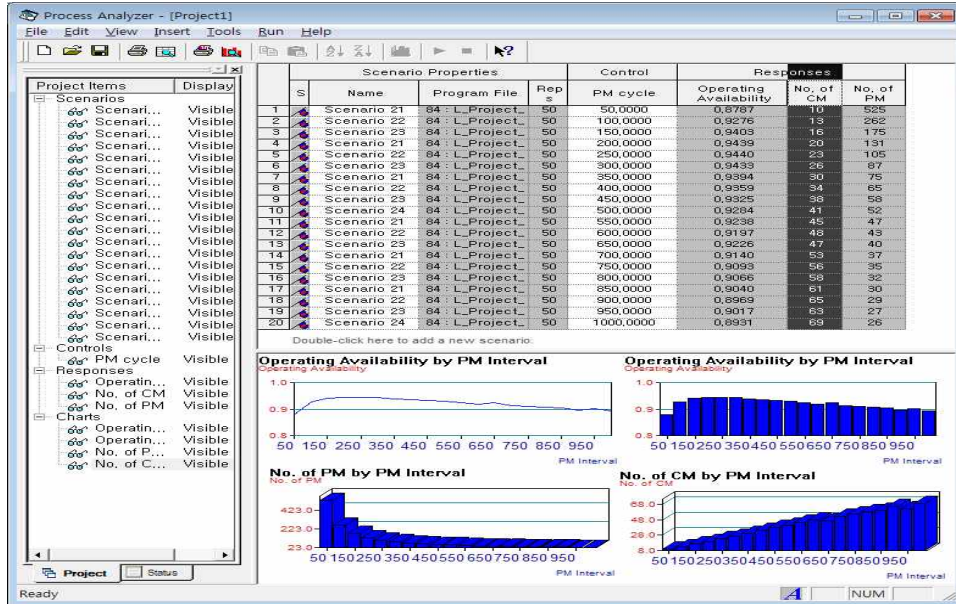
<그림 10> 예방정비주기와 운용가용도의 상관관계 경향

3.6 실험설계 및 시뮬레이션 수행

실험은 예방정비주기를 변화시켜가며 50시간 간격으로 50~1,000시간의 구간에 대한 총 20개의 대안을 분석 한다. 시뮬레이션의 길이(Length)와 시행 횟수(Replication)는 <표 6>와 같이 설정하였다. 이 설정은 운용가용도의 95%신뢰구간 1/2폭이 약 0.01로써 1%정도의 오차를 의미하고 신뢰할만한 결과를 도출할 수 있는 설정이라고 판단된다. 본 실험은 ARENA에서 제공하는 Process Analyzer를 이용하여 수행하고, 그 결과는 <그림 7>과 같다.

<표 6> 시뮬레이션 길이와 시행 횟수

구분	값
시뮬레이션 길이	1,095 (일)
시뮬레이션 시행 횟수	50 (회)

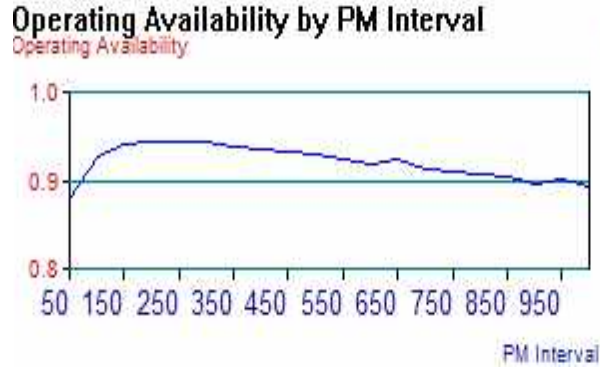


<그림 11> 시뮬레이션 결과 - PAN

<표 7> 시뮬레이션 결과

대안	예방정비주기 (PM_T)	운용가용도 (A_O)	비고
1	50	0.8787	
2	100	0.9276	
3	150	0.9403	
4	200	0.9439	
5	250	0.9440	운용가용도 최고점
6	300	0.9433	
7	350	0.9394	
8	400	0.9359	
9	450	0.9325	
10	500	0.9264	
11	550	0.9238	
12	600	0.9197	
13	650	0.9226	
14	700	0.9140	
15	750	0.9093	
16	800	0.9066	
17	850	0.9040	
18	900	0.8969	
19	950	0.9017	
20	1000	0.8931	

<표 7>의 결과를 바탕으로 일반화 모델을 통한 시뮬레이션 결과 그래프는 <그림 8>과 같다.



<그림 12> 시뮬레이션 결과 - 그래프

시뮬레이션 결과는 우리가 사전에 예상한 결과와 유사한 경향성을 띄고 있으므로 일반화 모델의 설계는 문제가 없다고 판단할 수 있다. 일반화 모델을 구체화 시키고, 보다 정확한 수치를 입력한다면 특정 무기체계의 시뮬레이션이 가능하다.

4. 사례적용

앞서 설계된 일반화 모델을 특정 무기체계에 적용해 보고자 한다. 적용할 무기체계는 무인항공기 체계로 복잡한 운용개념을 가지고 있는 시스템이다. 일반화 모델을 확장하여 복잡한 운용개념을 구체화한다.

4.1 운용 시나리오

무인항공기의 운용 시나리오는 현재 미군의 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 운용시나리오를 참고로 재구성하였다.[8]

“XX체계의 주된 목적은 임무지역의 정찰 및 탐색이다. 크게 비행체와 지상체로 구분되고, 비행체는 O대, 지상체는 O대 운용된다. 비행체는 임무지역 상공을 비행하며 임무정보를 수집하고, 수집된 임무정보를 지상체로 전송한다. 지상체는 전송받은 임무정보를 분석하고, 비행체를 조종하는 역할을 수행한다. 비행체와 지상체가 가시권 영역에 있을 때에는 B Link를 이용하고, 가시권영역을 벗어나게 되면 A Link를 이용하여 송수신한다. 2개의 Link는 탑재부와 지상부로 구분되고, 탑재부와 지상부는 각각 비행체와 지상체의 Subsystem이다.

비행체 1회 비행의 제공시간은 OO시간이다. “비행전점검-이륙-임무수행-착륙-비행후점검”순으로 운용되고, 운용이 끝난 비행체는 ‘대기’상태가 된다. 기본적으로 임무지역 상공에는 비행체 1대가 계속 유지되며 임무를 수행해야 한다. 따라서 임무수행 종료시점

에 임박하면, 미리 다음 번 비행체를 작동시켜, 임무지역 상공에서 임무교대를 한다. 지상체는 무중단 시스템이다. 비행체와 지상체가 동시에 임무 가능해야 시스템이 임무가능 상태 이다.

A Link와 B Link는 직렬 구조(Series)이다. 그러므로 둘 중 하나라도 고장이 발생하면, 시스템의 고장이다. 비행체의 경우, 운용 중 고장이 발생하면 운용자는 그 즉시 대기 중인 다른 비행체를 작동시키고, 고장 비행체를 귀환시킨다. 이 때 비행체의 소실은 고려하지 않는다. 귀환한 비행체는 정비를 완료한 후 다시 ‘대기’상태로 돌아간다. 단 ‘대기’상태는 전원이 인가되지 않은 상태이므로 고장을 발견할 수 없다.

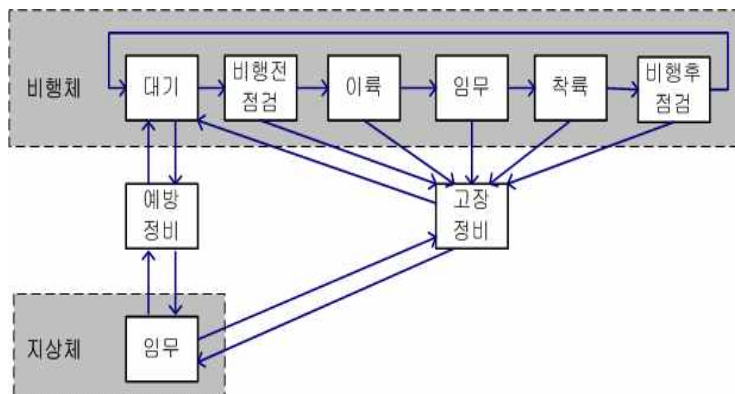
지상체의 예방정비주기는 ‘시간’으로 설정하지만, 비행체의 예방정비주기는 ‘시간’이 아닌 ‘비행횟수(Sortie)’로 설정한다. 비행체의 ‘대기’상태에서는 시스템의 고장여부를 파악할 수 없고, ‘운용’ 중에는 예방정비를 수행할 수 없기 때문이다.

A Link와 B Link 각각의 최적 예방정비주기를 설정하는 것이 목적이다. 이 때, 5년의 운용 기간 동안 목표 운용가용도는 90% 이상이고, 최소의 정비비용이 발생하는 대안을 제시하도록 한다.“

이 시나리오 역시 동적, 이산, 확률적 시뮬레이션에 속한다고 볼 수 있다. 앞서 설계한 일반화 모델과의 차이점을 살펴보면, 첫째, 시스템의 구성이 다르다. 하나의 시스템 내에 독립적인 Subsystem이 존재하기 때문에 본 모델에서는 비행체 O대와 지상체 O대를 각각 Entity로 설정한다. 둘째, 복잡한 운용개념에 의해 고려해야하는 상태(State)가 다양하다. 상태가 다양할수록 Entity를 제어해야하는 로직이 복잡해진다. 셋째, 목표 운용가용도 제약 하에 정비비용의 최소화를 이루어야 한다는 점이다.

4.2 상태정의

시나리오에 근거하여 <그림 9>과 같이 상태를 정의한다. 일반화 모델의 ‘운용’ 및 ‘대기’상태가 ‘대기, 비행전점검, 이륙, 임무, 착륙, 비행후점검’으로 확장된다. 또한, ‘임무’상태는 비행체와 지상체를 구분해 주어야 한다. ‘예방정비’를 제외한 모든 상태에서 ‘고장정비’로의 이동이 가능해야한다.



<그림 13> 시뮬레이션 모델 상태 정의

4.3 속성 및 변수

시스템의 구성이 복잡해짐에 따라 변수와 속성도 복잡해진다. 변수는 2차 배열(Matrix)로 변경하고, 속성을 2차 배열의 인덱스(Index)로 활용한다.

<표 8> 속성 및 변수

구분	이름	설명
속성	Att_AVS	개체의 고유 식별 부호
	Att_Sortie	비행체의 임무비행 횟수
	Att_CMPM	고장정비/예방정비 구분
	Att_AorB	비행체/지상체 구분
	Att_Sub	하부시스템 식별
변수	Var_MTBFFData(2D)	시스템의 MTBF
	Var_MTBFFDataSub (2D)	하부시스템의 MTBF
	Var_FailTime(2D)	시스템의 고장 예약시간
	Var_State(2D)	개체의 현재 상태
	Var_DelayTime(2D)	개체의 이동 스케줄
	Var_TotalCost	누적된 총 비용
	Var_SubCost(2D)	하부시스템 비용
Var_MTTR(2D)	평균 정비시간	

4.4 입력자료 수집

입력 자료의 획득방법 및 간단한 설명을 <표 9>에 제시한다.

<표 9> 입력자료

구분	설명
시스템 MTBF	탐재부와 지상부, A Link와 B Link로 구분하여 각각을 구성하는 하부 장비의 MTBF를 입력자료로 사용한다. 유사무기체계의 값을 참조한다.
시스템 스케줄	상태별 체류시간, 즉, 시스템 스케줄을 입력한다. 시간은 상수(Constant)이다.
정비시간	CM의 정비시간은 군용항공기의 통상적 부대급 평균 수리시간이고, PM의 정비시간은 공군 유사장비의 계통별 평균예방정비시간을 이용하였다.
정비비용	장비수리비와 인건비의 합으로 계산한다. 인건비는 군수사 직접노무비를 기준으로 산출하고, 장비수리비는 장치 당 회로카드조립체 수량대비 개당 평균 수리비용의 비율로 산출하였다. 정확한 비용의 산출을 위해서는 더욱 상세화 된 비용분석이 필요하지만, 예방정비주기 설정을 위한 최소한의 입력을 고려하였다.

4.5 모델설계

1) 모델 설명

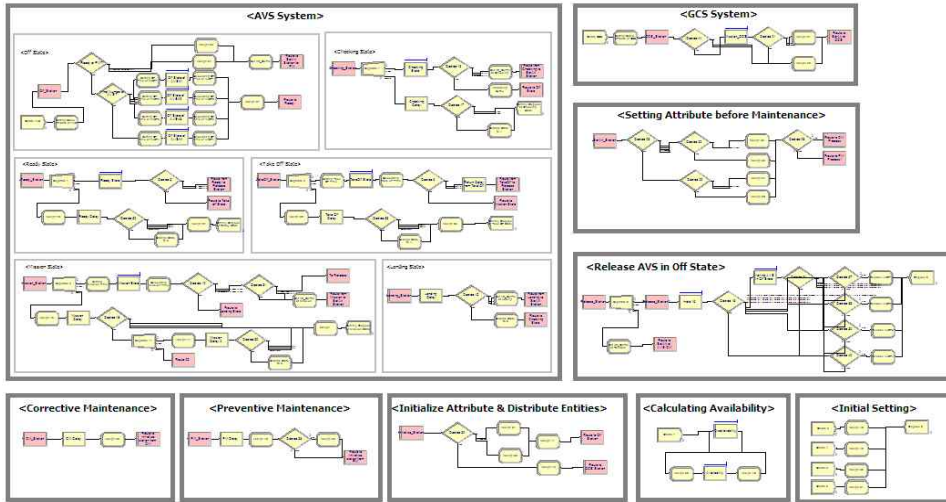
<그림 10>은 일반화 모델의 각 상태를 구체화 시킨 모습이다. AVS System은 비행체가 가질 수 있는 6개의 상태를 의미한다. GCS System은 지상체의 ‘운용’상태이다. CM과 PM도 각각의 Submodel로 구현되어 있다. 고장 발생 시 대기 중인 비행체의 호출을 위해 별도의 Submodel을 추가한다. 시뮬레이션 시작 시 초기값 세팅을 위한 부분과 운용가용도를 계산하기 위한 부분도 포함되어 있다. 모델은 총 O개의 Entity를 발생하여 비행체 O대와 지상체 O대를 표현하고, 남은 1개는 초기값 세팅을 위해 사용되고 세팅 후 바로 소멸한다. Entity의 이동은 제어로직에 의해 구현되고, Route 모듈을 통해 이루어진다.

<표 10> 입력자료

구분	설명
시스템 MTBF	탑재부와 지상부, A Link와 B Link로 구분하여 각각을 구성하는 하부 장비의 MTBF를 입력자료로 사용한다. 유사무기체계들의 값을 참조한다.
시스템 스케줄	상태별 체류시간, 즉, 시스템 스케줄을 입력한다. 시간은 상수(Constant)이다.
정비시간	CM의 정비시간은 군용항공기의 통상적 부대급 평균 수리시간이고, PM의 정비시간은 공군 유사장비의 계통별 평균예방정비시간을 이용하였다.
정비비용	장비수리비와 인건비의 합으로 계산한다. 인건비는 군수사 직접노무비를 기준으로 산출하고, 장비수리비는 장치 당 회로카드조립체 수량대비 개당 평균 수리비용의 비율로 산출하였다. 정확한 비용의 산출을 위해서는 더욱 상세화 된 비용분석이 필요하지만, 예방정비주기 설정을 위한 최소한의 입력을 고려하였다.

2) 제어 로직

일반화 모델과 같이, 모델은 정의된 속성 및 변수로 제어되고 그 내용은 <표 10>과 같다.



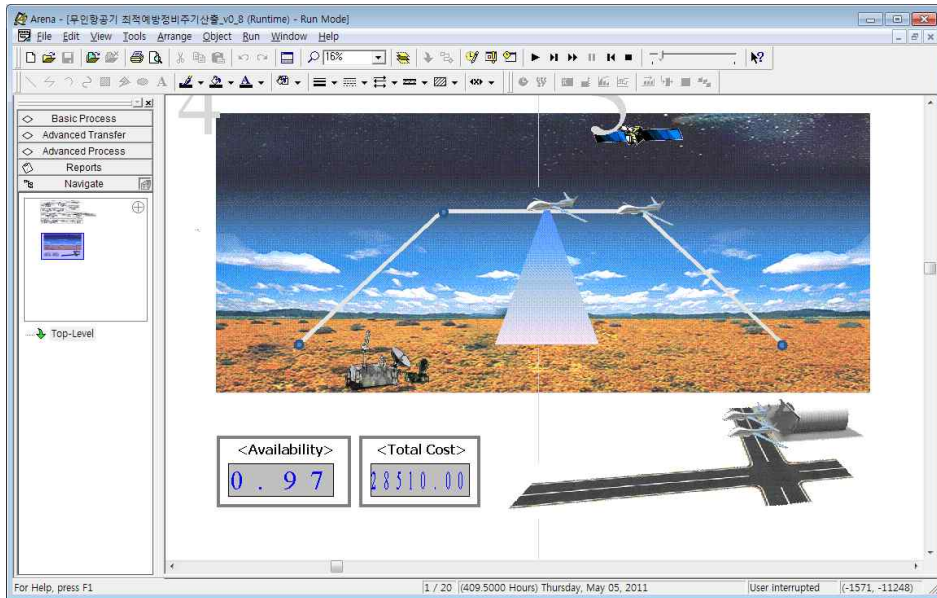
<그림 14> ARENA로 구현된 XX체계 모델

<표 11> 시스템 상태변환 조건

구분	~에서	~으로	조건
비행체	대기	비행전점검	현재가동중인 비행체의 고장 (대기중인 비행기 즉시 호출)
		비행전점검	현재가동중인 비행체의 임무완료 임박 (대기중인 비행기 사전 호출)
		예방정비	예방정비 시점 도래
	비행전점검	이륙	비행전점검 완료
		고장정비	점검중 고장 발견
	이륙	임무	임무지역 도달
		고장정비	이륙 중 고장발생
	임무	착륙	임무수행 완료 (임무 교대)
		고장정비	임무 중 고장발생
	착륙	비행후점검	비행체 귀환
고장정비		착륙 중 고장발생	
비행후점검	대기	비행후점검 완료	
	고장정비	점검중 고장 발견	
지상체	임무	고장정비	임무 중 고장발생
		예방정비	예방정비 시점 도래

3) 애니메이션

모델 디버그(Debug) 및 사용자 편의를 위해 애니메이션을 구현한다.



<그림 15> 모델 애니메이션

4.6 실험설계 및 시뮬레이션 수행

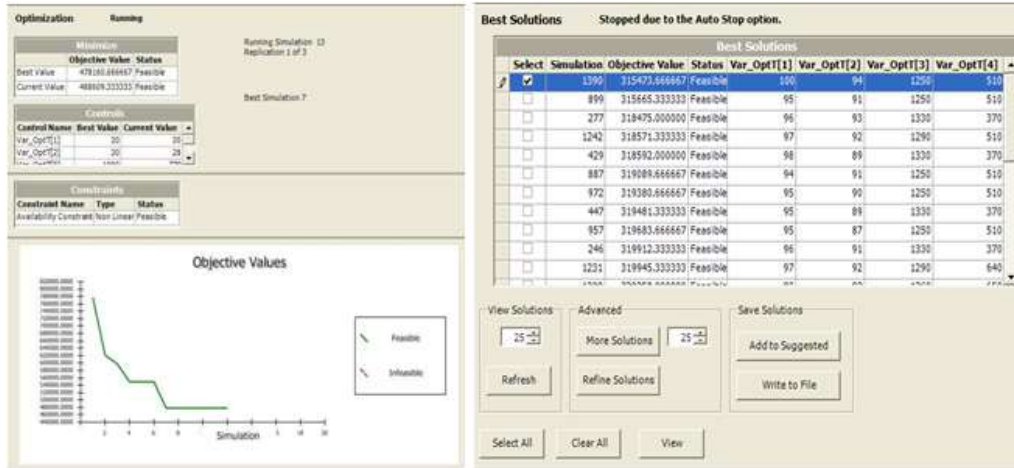
<표 12> 시뮬레이션 길이와 시행 횟수

구분	값
시뮬레이션 길이	43,800 (시간)
시뮬레이션 시행 횟수	20 (회)

본 모델은 많은 변수들이 배열(Matrix)로 구성되어 있어, PAN(Process Analyzer)을 통해 실험설계하기가 어렵기 때문에 다른 최적화 방법을 이용해야한다. ARENA는 OptQuest라는 내부 기능을 제공한다. 이 기능은 타부 탐색법(Tabu Search) 및 산발 탐색법(Scatter Search)이라는 발견적 기법을 사용하여, 입력 통제 공간에서 지능적으로 탐색을 해 가며, 신속하고 신뢰성 있는 최적해를 도출한다[12].

4.7 시뮬레이션 결과

<그림 12>와 같이 도출된 최적해를 정리하면 <표 12>과 같다.



<그림 16> OptQuest 결과

<표 13> 시뮬레이션 결과

비행체		지상체	
A Link	B Link	A Link	B Link
100(회)	94(회)	1,250(시간)	510(시간)

4.8 결과 분석

비행체의 A Link는 100회 비행 후, B Link는 94회 비행 후 예방정비를 수행해야 한다. 지상체의 A Link는 1,025시간 운용 후, B Link는 510시간 운용 후에 예방정비를 수행해야 한다.

비행체의 경우 지상체보다 훨씬 긴 주기를 가지고 있다. 그 이유는 비행체는 O대가 존재하여, 서로의 고장을 보완하여 가용도를 높이기 때문이다. 그러므로 비행체는 전체 시스템의 운용가용도에는 별 영향을 미치지 못한다고 판단된다. 반면, 지상체의 고장은 시스템의 전체의 가동 불가 상태를 발생하기 때문에 상대적으로 비행체보다 짧은 예방정비가 필수이다.

5. 결론

예방정비는 무기체계의 전투준비능력을 보장하기 위한 중요한 부분이며, 예방정비의 주기를 적절히 계획하는 것은 적은 자원으로 가용도를 향상할 수 있는 효과적인 방법이다. 본 연구에서는 무기체계의 예방정비주기를 최적화하기 위해 시뮬레이션 기법을 이용하는 방법을 제시하였다.

먼저 ‘일반화 모델’의 개념을 정의하고, 그 후 ‘일반화 모델’을 이용한 특정 무기체계 사례분석을 하였다. ‘일반화 모델’은 특정 무기체계의 고유한 특성을 반영하기 위한 범용적인 그릇과 같은 개념이다. ‘일반화 모델’은 무기체계의 일반적인 운용개념과 정비정책이 반영되어 있고, 실제 무기체계에 적용(Customized)이 용이하도록 각 상태를 모듈화하여 설계되었다. ‘일반화 모델’의 최초 상태는 각각의 모듈이 구체화 되어 있지 않지만 특정 무기체계 적용 시 각 모듈을 필요에 따라 구체화하여 사용할 수 있다. ‘일반화 모델’에 대한 검증은 무기체계의 운용가용도와 예방정비주기의 상관관계 경향에 대한 비교를 통해 수행하였고, 사례 적용 연구를 통해 모델의 유연성(Flexibility)을 보였다.

본 연구에서 제시된 사례는 ‘일반화 모델’을 무인항공기 체계에 적용하는 것이었다. 무인항공기의 복합적인 운용개념과 비대칭적 시스템 구조를 반영하였고, 운용가용도의 제약 하에서 정비비용을 최소화하는 예방정비주기의 최적 대안을 분석하였다. 현재 사례의 한계점은 입력값의 일부가 유사무기체계의 데이터 혹은 예측된 값이라는 것이다. 만약 무기체계의 운영자료(Field Data)를 활용할 수 있다면, 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성이 높아질 것으로 판단된다.

향후 ‘일반화 모델’은 무기체계의 다단계/비대칭 정비 계단 구조, 수리부속재고 정책, 시스템의 불규칙적인 운용스케줄 등을 반영한 확장이 가능하다. 각 부분을 구체화 하여 ‘일반화 모델’에 반영 한다면, 단일 무기체계에 대한 M&S의 완성도가 더욱 높아질 것이라 판단된다.

참고문헌

- [1] 김우현, “예방정비 및 예비품 재고관리를 통한 시스템의 지속성 개선”, 한양대학교 대학원, 2009, pp.18-23.
- [2] 김혜령, 백순흠, 최상영, “무기체계 운용가용도 산정 모델에 관한 연구”, 『한국국방경영분석학회지』, 제35권, 제3호, 2009, pp.19.
- [3] 박상곤, “해군 함대 수리창에서의 함정 운용가용도 영향 요인 분석”, 국방대학교, 2005, pp.56-58.
- [4] 박세훈, 문성암, 이정환, “정비능력, 예비품 수량 제약조건 하에서의 운용가용도 시뮬레이션 연구”, 『한국시스템다이내믹스연구』, 제11권, 제2호, 2010.
- [5] 해군규정, “잠수함(정) 정비규정”, 해군본부, 2007, p.9-3-8.
- [6] Barlow, R. E. and Hunter, L. C., “Optimum preventive replacement policies”, *Operations Research*, Vol. 8, 1960, pp.90-100.
- [7] James V. Jones, “INTEGRATED LOGISTICS SUPPORT HANDBOOK”, 학연문화사, 2nd, 2008, pp.6.8-6.9.
- [8] John G. Drew, Russell Shaver, Kristin F. Lynch, Mahyar A. Amouzegar, Don Snyder, “Unmanned Aerial Vehicle End-to-End Support Considerations”, *the RAND corporation*, 2005, pp.25-36.
- [9] Juang, M. G. and G. Anderson, “A Bayesian method on adaptive preventive maintenance problem”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 155, No. 2, 2004, pp.455-473.
- [10] Kardon, B. and L. D. Fredendall, “Incorporating overall probability of system failure into a preventive maintenance model for a serial system”, *Journal of Quality Maintenance Engineering*, Vol. 8, No. 4, 2002, pp.331-345.
- [11] Wang, H., “A Survey of maintenance policies of deteriorating systems: Invited review”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 139, No. 3, 2002, pp.469-489.
- [12] W. David Kelton, Randall P. Sadowski, David T. Sturrock, “Simulation with Arena”, *The McGraw-Hill Companies*, 4th, 2007, pp.304-309.
- [13] MIL-STD-721C, “Definitions of Terms for Reliability and Maintainability”, 1981, pp.8.