

항공기 예비엔진 및 모듈 재고수준이 운용가용도에 미치는 영향

이상진*† · 배주근** · 김민규***

* 국방대학교 국방관리학과

** 공군 3비행단

*** 공군 20비행단

The Impact of Aircraft Spare Engine & Module's Inventory Level on Operational Availability

Sang Jin Lee*† · Ju Kun Bai** · Min Gyu Kim***

* Department of Defense Management, KNDU

** Lieutenant Colonel, ROKAF

*** Major, ROKAF

Key Words : Operational Availability, Multiple Regression, Meta Model, Integer Programming

Abstract

It is difficult to determine an optimal inventory level of aircraft engine and modules to achieve the target operational availability since F100-PW-200 & 229 engines of the F-16 & KF-16 aircraft are consisted of 5 modules with different failure rates and costs. This study presents a decision model, combining an integer programming problem and a regression metamodel. Data for the metamodel was attained from results of a simulation model, that represents operational and repair process of F-16 and KF-16. The objective function of an integer programming problem is maximizing the operational availability, representing pessimistic circumstances. Finally, an integer programming problem with a metamodel can make an optimal decision of the inventory level.

1. 서 론

한국 공군의 주력항공기인 F-16과 KF-16은 단발 엔진으로 구성되어 있으며, 항공기 특성상 엔진이 항공기 전체 운용가용도에 크게 영향을 미치고 있다. 그런데, F-16과 KF-16 엔진은 이전 세대 항공기 엔진과는 달리 모듈개념으로 구성되어 있으며, 이러한 모듈형 엔진은 기존 완제 엔진과는 구별되어 모듈별로 고장률과 수명주기에 차이가 있다.[2] 따라서 모듈형 항공기 예비엔진 및 모듈 최적 재고수준 결정은 기존 완제엔진

의 수리부속 재고예측 방법과는 다르게 수행될 필요가 있다.

적정 수리부속 재고모델은 Sherbrooke[11]에 의해 제시된 METRIC(Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control)으로부터 시작되었다. METRIC은 기지와 창 2단계(Echelon)로 나누어진 미 공군 항공기 정비체계에서 복구성 수리부속의 재고위치와 적정량을 결정하기 위해 고안되었다. METRIC은 수리부속의 재고수준 계산을 단순화하기 위해 수리부속 수요가 일정하며 그 분포가 복합 포아송 분포를 따르고, 기지와 창의 정비능력을 초과하는 작업량은 발생하지 않으며, 전환보급은 고려하지 않고, 수리부속은 폐기하지 않는 것으로 가정하였다.

† 교신저자 sjlee@kndu.ac.kr

METRIC의 단일 계층(Indenture) 제한사항을 개선하기 위해 Muckstadt[7]에 의해 MOD-METRIC이 제안되었다. MOD-METRIC은 항공기의 구성품과 하부 조립품에 대해 각 기지와 창에서의 최적 재고수준을 결정하는 모형으로 품목 수요율을 고정하여 가정하므로 실제 수요량 보다 수요예측이 작은 결과가 초래되었다. 이러한 단점을 보완하기 위해 Slay[14]에 의해 VARI-METRIC이 제시되었다. VARI-METRIC은 품목 수요의 분포를 포아송 분포로 가정함과 동시에 포아송 분포의 평균 분포를 감마분포로 가정하여, 두 분포를 결합한 음이항 분포로 가정하였다.

VARI-METRIC은 재고부족량 기댓값의 총합을 최소화하여 재고수준의 정확성이 입증되고 있으나[12] 이들 재고부족량이 항공기 운용에 대한 영향력을 확인할 수가 없었다. O'Malley[8]는 VARI-METRIC의 수요예측 방법과 항공기 가용도를 목적함수로 사용함으로써 비용 대 가용도 효과를 직접 측정하여 최적의 재고수준을 결정하는 AAM(Aircraft Availability Model)을 만들었다.

이들 기존의 모형들에 사용된 변수들은 시간에 관계없이 확정적인 값으로 평형상태(Steady State)의 적정 재고수준은 결정할 수 있으나 전시(Wartime)와 같이 입력변수들의 값이 시간에 따라 변하는 상황 하에서는 이를 적용하기가 어려웠다. 동적상황에서 적정 재고수준을 결정하기 위해 고안된 것이 Dyna-METRIC이며, 이 Dyna-METRIC에서 제안된 재고부족량 기댓값 계산모델과 가용도가 결합되어 ASM(Aircraft Sustainability Model)이 개발되었다.[13] ASM을 포함한 METRIC 계열 모형들이 기존 모형을 개선했다고는 하나 많은 부분에서 문제점을 가지고 있다. 가용도 계산 모형에서 예방정비 시간을 고려하지 않으며, 고장 품목의 수리대기 시간 등을 고려하지 않은 것이다. 또한 정비체계 내에서 품목의 고장이 일반분포를 따르는 경우에는 METRIC 모형을 적용할 수 없다는 문제점이 있다. 이를 해소하기 위해 시뮬레이션 모형이 사용되는데, 시뮬레이션은 수리부속 수요나 수송시간 등이 일반분포인 경우라도 사용할 수 있으며 또한 예방정비와 수리부속 대기 시간 등의 다양한 정비절차를 포함할 수 있는 장점이 있다. 정비부대별 수리부속의 최적화를 위해 시뮬레이션과 결합한 유전 알고리즘[3]과 휴리스틱 방법[4]이 사용되고 있다.

항공기 엔진은 앞서 언급한 바와 같이 모듈개념으로 적용되기 때문에 예비엔진과 모듈 각자의 재고량이 항공기 운용가용도에 미치는 영향력을 분석할 수 있다.

이 연구는 엔진과 모듈의 최적 재고수준 결정을 위해 시뮬레이션과 메타모델을 결합한 방법을 사용한다.

메타모델의 입력 자료를 구하기 위해 현행 항공기 운영 및 정비 과정을 묘사한 시뮬레이션 모형을 구성한다. 시뮬레이션 모형은 예비엔진과 모듈의 다양한 재고수준인 시나리오에 따른 운용가용도를 측정하기 위한 것이다. 다양한 재고수준을 시나리오로 한 시뮬레이션 모형을 실행하여 얻은 결과값인 운용가용도와 재고수준이 메타모델의 입력 자료가 된다. 메타모델은 운용가용도를 종속변수로, 예비엔진과 모듈의 재고수준을 독립변수로 하여 다중 회귀모형으로 구성할 수 있다.[5,6,9] 최종적으로, 메타모델과 예산을 제약식으로 하고 군의 재고정책과 관련한 정책을 목적함수식을 한 정수계획 모형을 형성하여 최적 재고수준을 결정한다.

2. 시뮬레이션 및 메타모델

2.1 시뮬레이션 모형

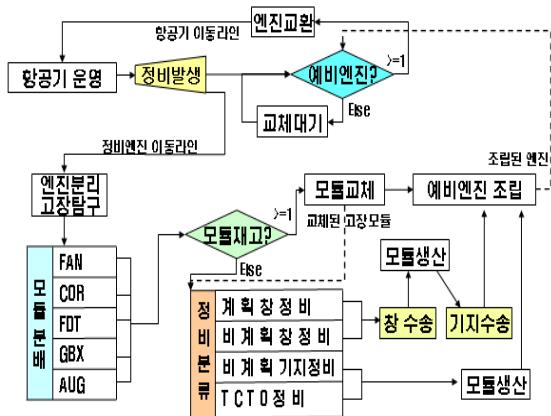
본 연구에서 구성한 시뮬레이션 모형의 가정사항은 다음과 같다.

첫째, 정비순환에서 엔진이나 모듈을 폐기하거나 새로운 것으로 교체하지 않는다. 신품 엔진이나 모듈의 단가가 높아서 정비현장에서는 가능한 품목을 재사용하고 있기에 이 가정은 크게 무리가 없다. 둘째, 부품 부족시 엔진이나 모듈의 부속유용(Cannibalization)은 정비규정에서 정한 바와 같이 허용하지 않는다. 셋째, 본 연구는 엔진과 모듈과 관련된 정비인 계획 창정비, 비계획 창정비, 비계획 기지정비 및 TCTO 정비만을 포함한다. 따라서 이들 정비와 관련이 없는 1단계 정비인 부대급에서 작업이 종료되는 결함은 포함시키지 않았다. 넷째, 항공기 운용가용도 측정에 있어 다른 구성품의 고장은 고려하지 않고 엔진의 고장만으로 제한하는 점을 감안하여 항공기의 운용가용도를 실제 목표치보다 높은 F-16 90%이상, KF-16 95%이상으로 설정하였다.

F-16과 KF-16 엔진은 P&W 회사에서 제작한 것으로 엔진기종은 F100-PW-220과 229이다. 두 엔진 기종 공통적으로 5개의 모듈로 구성되어 있으며 모듈은 각각 fan, core, augmentor, gearbox, FDT(Fan Drive Turbine)이다.

시뮬레이션 모형은 F-16과 KF-16의 실제 엔진 정비체계와 가능한 유사하게 표현하였으며, 입력된 자료

를 통해 항공기의 운용가용도를 계산할 수 있도록 구성하였다. 항공기 운용가용도 계산은 정비가 발생하여 현재 가동중인 항공기 댓수에서 총 항공기 댓수로 나누어 준 값을 적용하여 계산하였다. 본 연구에서는 <그림 1>과 같이 시뮬레이션 모형을 크게 항공기 운영과 정비엔진의 이동라인 두 가지로 구성하였다.[1]



<그림 1> 시뮬레이션 모형 구성도

항공기 이동라인에서는 공군의 작전 수행을 위해 F-16과 KF-16 항공기가 작전에 투입되어 운영됨에 따라 항공기 엔진의 고장이나 예방차원의 계획 정비가 발생한다. 엔진이 정비 상태에 들어가면, 해당 항공기는 불가동 상태에 있게 되고 기지의 항공기 운용가용도는 낮아지게 된다. 해당 부대에서 보유하고 있는 예비엔진의 수량을 확인하여 예비품을 보유하고 있으면 엔진을 교환하여 항공기는 다시 가동되며 새로운 임무에 투입되거나 운영 대기를 한다.

정비소요가 발생한 엔진의 이동라인의 경우, 고장이 발생한 엔진은 해당 야전정비에서 엔진을 분리하여 고장탐구를 실시해서 결함 발생 모듈을 찾아낸다. 해당 모듈의 결함을 점검한 후 모듈의 재고 보유를 확인하여 재고가 있으면 모듈을 교체하여 사용이 가능한 예비엔진이 되어 수량이 한 개 증가된다. 모듈의 재고가 없으면 모듈은 계획/비계획 창정비, 비계획 기지정비, TCTO 정비의 4가지 정비로 분류되어 모듈을 수리하게 된다. 결함이 아닌 계획 정비는 예방 정비시간이 도래하는 경우, 엔진을 탈거하여 창으로 발송하여 창정비를 수행하며, 정비 후 기지로 이송하여 모듈로 저장된다. 수리 완료된 모듈은 다른 4개의 모듈이 한 개 이상 재고가 있을 때에만 조립이 되어 예비엔진으로 만들어진다.

2.2 메타모델

메타모델은 규모가 크고 복잡한 시뮬레이션 결과를 상대적으로 정확하게 예측할 수 있도록 간소화된 모델을 의미하며 모델의 모델이라 부른다. 1절의 시뮬레이션 모형에서 예비 엔진과 모듈의 다양한 재고수준을 입력변수로 한 시나리오에 대해 각각의 운용가용도를 반응변수로 측정할 수 있다. 시뮬레이션의 결과값인 재고수준을 독립변수로, 운용가용도를 종속변수로 한 다중회귀모형을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$A_{0i} = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \beta_4 X_{4i} + \beta_5 X_{5i} + \beta_6 X_{6i} + \epsilon_i$$

여기서 i 는 시나리오를 표시하며, A_{0i} 는 i 번째 시나리오의 항공기 운용가용도를 의미한다. X_{1i} 는 i 번째 시나리오에서 예비엔진의 재고수준을 의미하며 나머지 독립변수($X_{ji}, j=2, \dots, 6$)는 i 번째 시나리오에서 각 예비모듈의 재고수준이다. 다중 회귀계수 $\hat{\beta}_j (j=1, \dots, 6)$ 는 엔진과 모듈의 추가적인 재고보유가 항공기 운용가용도에 미치는 변화량이다. ϵ_i 는 i 번째 시나리오의 잔차항이다. 다중 회귀계수의 추정치 $\hat{\beta}_j (j=1, \dots, 6)$ 를 구하기 위해서는 엔진과 모듈의 재고수준과 이에 따른 항공기 운용가용도를 입력자료로 한 다중회귀분석을 수행하여야 한다.

본 연구는 시뮬레이션에 입력할 엔진 및 모듈의 재고수준에 대한 시나리오를 형성하기 위한 실험 설계법으로 LHD(Latin Hypercube Design)나 NOLH(Nearly Orthogonal Latin Hypercube) 보다 2k 인자 설계법을 활용하였다.[10] 이 연구의 목적이 어느 실험설계법이 더 효율적인지를 다루기보다는 다양한 시나리오를 만드는 것임으로 기존에 많이 활용되는 2k 인자 설계법을 사용하여 시나리오를 형성하였다.

본 연구에서는 2k 인자 설계법을 활용하여 엔진과 모듈(총 6개 변수)과 재고의 최소값과 최대값인 총 2개 수준을 조합하여 64가지($2^6=64$) 시나리오를 형성할 수 있다. 이외에도 현재 재고수준을 하나의 시나리오로 더 추가하여 총 65가지의 시나리오에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

3 시뮬레이션 모형 실험

3.1 시뮬레이션 입력 자료

F-16과 KF-16 엔진 운영 자료는 1998년부터 2009년까지 총 12년간 실적 자료를 활용하였다. 계획 창정

비 건수 및 정비 종류별 결합발생 건수와 TCTO 수행 실적을 합하면 <표 1>과 같은 전체 정비발생 건수를 구할 수 있다.

<표 1> 엔진 전체 정비발생 건수

구분	계획 창정비	비계획창 정비	비계획 기지정비	TCTO 정비	계	
fan	F-16	37	14	47	9	107
	KF-16	85	5	55	9	154
core	F-16	33	24	56	0	113
	KF-16	85	8	97	45	235
FDT	F-16	37	39	48	98	222
	KF-16	78	6	73	19	176
aug	F-16	39	1	13	104	157
	KF-16	111	2	9	7	129
gbx	F-16	45	1	10	1	57
	KF-16	91	5	10	11	117
계	F-16	191	79	174	212	656
	KF-16	450	26	244	91	811

엔진의 MTBM은 각각 독립적인 모든 모듈의 MTBM을 포함하고 있다. 엔진 작동시간 분석 결과 F-16의 경우, 12년간 총 비행시간은 80,640시간이다. 12년간 엔진 작동시간은 146,764.8시간이며 연간 12,230.4시간, 월평균 1,019.2시간이다. KF-16의 경우, 대당 월평균 비행시간이 F-16과 동일한 것으로 가정하고, 비행 및 엔진 작동시간을 산출하였다.

엔진 전체의 정비발생 건수를 이용하여 MTBM을 산출하면 <표 2>와 같다.

<표 2> F100-PW-220 / 229 엔진 및 모듈 MTBM

구분	MTBM(시간)		비 고
	F-16	KF-16	
엔진	223.73	413.64	$\frac{\text{엔진작동시간}}{\text{엔진 결합건수}}$
fan	1,371.63	2,178.33	$\frac{\text{엔진작동시간}}{\text{모듈별 결합건수}}$
core	1,298.80	1,427.50	
FDT	661.10	1,906.04	
aug	934.81	2,600.48	
gbx	2,574.82	2,867.20	

F-16의 경우, 12년간 총 엔진 작동시간인 146,764.8시간을 계획/비계획 정비 및 TCTO 정비를 합한 총 정비건수로 나눠주어 엔진 및 모듈별 MTBM을 구할 수 있다. KF-16의 경우, 12년간 총 엔진 작동시간인 335,462.4시간을 계획/비계획 정비 및 TCTO 정비를 합한 총 정비건수로 나눠주어 엔진 및 모듈별 MTBM을 구할 수 있다.

정비 소요발생 시간 간격은 각 정비소요별 별도의 확률분포를 구하여 구현할 수 있으나, 본 연구에서는 모든 정비소요를 종합하여 발생하도록 하였다. 이때 MTBM을 이용하여 산출한다. 정비발생률은 구성품의 신뢰도를 표현하는 하나의 방법으로 MTBM 산출결과를 참조하였다. 시뮬레이션 모형에서 사용된 정비소요 도착시간 간격은 엔진 MTBM을 이용하여 다음과 같이 산출한다.

$$MTBM = \frac{1}{\lambda + fpt}, \lambda + fpt = \frac{\text{엔진 정비건수}}{\text{연간엔진작동시간}} \quad (1)$$

여기에서 λ 는 고장률, fpt 는 예방 정비빈도를 의미한다. 상기 운영실적을 분석하면 F-16의 경우, 항공기 한 대는 233.690일마다 1건의 정비가 발생한다.

KF-16의 경우도 동일한 방법으로 계산한 결과 항공기 한 대는 432.055일마다 1건의 어떤 종류의 정비가 발생하므로 시뮬레이션에서는 이 값을 적용하였으며, 정비기간에 대한 확률분포 추정에는 1998년부터 2009년까지의 실제 정비자료를 ARENA의 입력분석기(input analyzer)를 사용하여 산출하였다.

3.2 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션 기간은 항공기 수명인 20년을 가정하여 7,300일 동안으로 하였고, 시뮬레이션 반복회수는 시나리오당 100회씩 실시하였다. 운용가용도 측정을 위한 시뮬레이션 모형은 ARENA 11.0을 사용하여 구현하였다. 시뮬레이션 결과 중에서 대표적인 재고수준별 항공기 운용가용도 변화를 살펴보면 <표 3>과 <표 4>와 같다.

F-16의 경우 현재고인 엔진 4개, fan 5개, core 8개, FDT 5개, aug 6개, gear box 5개를 보유하는 경우에 항공기 운용가용도는 84.38%로 도출되었다. 재고를 각각 1개씩 보유하는 경우 67.57%의 운용가용도가, 최대수량인 8개씩 보유하는 경우에는 92.99%로 도출되었다. 다른 모듈들의 수를 모두 1개로 고정하고 엔진을 8개로 했을 때 운용가용도는 81.32%로 나타났다.

<표 3> F-16 시뮬레이션 결과

시나리오	재고수준						운용가용도
	엔진	fan	core	FDT	aug	gbx	
1	1	1	1	1	1	1	0.6757
...
33	8	1	1	1	1	1	0.8132
...
64	8	8	8	8	8	8	0.9299
65	4	5	8	5	6	5	0.8438

<표 4> KF-16 시뮬레이션 결과

시나리오	재고수준						운용가용도
	엔진	fan	core	FDT	aug	gbx	
1	1	1	1	1	1	1	0.7853
...
33	13	1	1	1	1	1	0.9013
...
64	13	13	13	13	13	13	0.9848
65	9	12	12	13	4	9	0.9464

KF-16의 경우 현재고인 엔진 9개, fan 12개, core 12개, FDT 13개, aug 4개, gear box 9개를 보유하는 경우 항공기의 운용가용도가 94.64%로 도출되었다. 각각 1개씩만 보유하는 경우에는 78.53%로 최대 수량인 13개씩 보유하는 경우에는 98.48%로 도출되었다. 다른 수리부속들의 수를 모두 1개로 고정하고 엔진을 13개로 했을 때는 운용가용도가 90.13%로 나타났다.

4. 메타모델 및 정수계획모형 실행

4.1 메타모델 실행

메타 다중회귀모형은 65가지 시나리오를 입력 자료로 회귀분석도구로 SPSS 12.0을 사용하였다. 회귀분석 결과는 <표 5>와 같다.

모델의 결정계수는 0.954으로 예비엔진과 5개 모듈의 재고수준이 항공기 운용가용도에 대해 95.4% 설명하고 있다. Y 절편, 예비엔진, fan, core, aug, gear

box 모듈은 운용가용도의 변화에 통계적으로 유의하다고 할 수 있다. 그러나 FDT 모듈은 유의확률이 0.1이상으로 나타나 운용가용도에 미치는 영향이 존재한다고 보기 어렵다. 예비엔진이나 모듈 중에서 운용가용도에 영향력이 가장 큰 순서는 엔진>core>augmentor 등의 순이다.

<표 5> F-16 회귀분석 결과

구분	Y절편	엔진	fan	core	FDT	aug	gbx
회귀계수	0.62974	0.01858	0.00219	0.00589	0.00055	0.00507	0.00109
t 통계량	93.362	31.829	3.750	10.168	0.949	8.704	1.867
유의확률	0.000	0.000	0.000	0.000	0.346	0.000	0.067
° 결정계수 : 0.954		° 표준오차 : 0.016347		° F비 : 201.7		° 유의확률(전체) : 0.000	

선행연구에 의하면 메타모델 개발시 유의확률이 높은 변수를 제거하는 것이 타당하나, 본 연구에서는 이 변수를 포함하였다. 이 연구는 메타모델을 이용하여 예산 제약하의 적정 재고수준을 결정하는 것이 목적이므로 해당변수를 제거할 경우 비용대 효과의 관계를 파악하기가 힘들기 때문이다. 모델의 결정계수(0.954)가 높고 유의확률(0.000)이 낮아 다중 회귀모형이 유의하므로 본 연구에서는 다음과 같은 다중 표본 회귀선을 산출하였다.

$$\hat{A}_0 = 0.62974 + 0.01858X_{엔진} + 0.00219X_{fan} + 0.00589X_{core} + 0.00055X_{FDT} + 0.00507X_{aug} + 0.00109X_{gbx} \quad (2)$$

종속변수는 달성하고자하는 운용가용도이며, Xj는 엔진과 각 모듈의 재고수준을 의미한다. 그리고 Y 절편인 0.62974는 모든 독립변수의 재고가 없을 때의 운용가용도를 나타낸다. 또한 이 메타모델은 회귀방정식 내에 각 독립변수의 효과지수(계수)를 나타내고 있다. 효과지수는 독립변수 중에 하나가 한 단위가 증가하는 경우의 운용가용도에 미치는 효과를 의미한다.

KF-16도 동일한 방법으로 회귀분석을 실시하였으며 <표 6>은 KF-16 엔진에 대한 시뮬레이션 결과를 회귀분석한 내용이다.

시뮬레이션 결과를 회귀분석한 것으로부터 다음과 같은 다중 표본회귀선을 형성하였다.

$$\widehat{A}_0 = 0.75534 + 0.00957X_{엔진} + 0.00107X_{fan} + 0.00422X_{core} + 0.00036X_{FDT} + 0.00051X_{aug} + 0.00078X_{gbx} \quad (3)$$

<표 6> KF-16 회귀분석 결과

구분	Y절편	엔진	fan	core	FDT	aug	gbx
회귀 계수	0.75534	0.00957	0.00107	0.00422	0.00036	0.00051	0.00078
t 통계량	179.775	41.224	4.637	18.281	1.568	2.181	3.362
유의 확률	0.000	0.000	0.000	0.000	0.122	0.033	0.001
◦ 결정계수 : 0.973	◦ 표준오차 : 1.1149630	◦ F비 : 347.537	◦ 유의확률(전체) : 0.000				

4.2 정수계획 모형

정수계획 모형에서 제약 조건식은 첫째, 예비엔진과 모듈의 재고수준이 목표가용도 이상을 달성해야 한다는 것이다. 둘째, 예비엔진과 모듈의 조달예산은 현재고 도입비용 이하로 해야 한다고 설정하였다. 셋째, 재고정책상 모든 품목은 하나 이상을 재고로 보유해야 한다는 식을 설정하였다. 목적함수식은 불확실성하의 의사결정 방법 중 하나인 최대최소값(Maximin) 기준을 활용하였다. 이는 모듈형 엔진의 경우 특정 모듈의 부족이 전체 예비 엔진의 조립에 영향을 주기 때문에 이러한 기준을 설정하였다.

이 정수계획모형은 목표 운용가용도를 달성하면서 재고 도입비용의 절감액을 식별할 수 있다. 또한 현재고 도입비용 내에서 운용가용도를 최대화하거나, 목표 운용가용도를 충족하면서 재고 도입비용을 최소화하는 모형으로 정책목적에 따라 모형을 변환하여 의사결정에 활용할 수 있다. 이런 논리를 기반으로 항공기 엔진 도입 초기 수리부속에 대한 모형을 다음과 같이 설정한다. 정수계획 모형은 Lingo 6.0을 사용하여 실행하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximin}(X_1, X_2, \dots, X_6) \\ & \text{s.t. } \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_6 X_6 \geq \text{목표 } A_0 \\ & C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_6 X_6 \leq \text{현재고 도입비용} \\ & X_i \geq 1 (i=1, \dots, 6) \text{ 이며 정수} \end{aligned}$$

F-16의 예비엔진 및 모듈 초기도입 재고수준을 결정하기 위해 목표 운용가용도는 90%이상으로 하였으며, 회귀계수는 메타모델의 결과값을 활용하였다. 엔진

및 모듈 조달예산은 현재고 도입비용인 38,226,408불로 제한하였으며 엔진과 모듈의 현재 단가자료를 구하여 활용하였다.

$$\text{Maximin}(X_1, X_2, \dots, X_6)$$

- s.t. ① $0.62974 + 0.01858 * X_1 + 0.00219 * X_2 + 0.00589 * X_3 + 0.00055 * X_4 + 0.00507 * X_5 + 0.00109 * X_6 \geq 0.9$;
- ② $4446870 * X_1 + 457733 * X_2 + 1578640 * X_3 + 395261 * X_4 + 524388 * X_5 + 87702 * X_6 \leq 38226408$;
- ③ $X_1 \geq 1; X_2 \geq 1; X_3 \geq 1; X_4 \geq 1; X_5 \geq 1; X_6 \geq 1$;
- ④ 모든 변수는 정수

KF-16은 목표 운용가용도를 95%이상으로 하였으며, 예산은 현재고 도입비용인 94,309,927불로 제한하였다.

$$\text{Maximin}(X_1, X_2, \dots, X_6)$$

- s.t. ① $0.75534 + 0.00957 * X_1 + 0.00107 * X_2 + 0.00422 * X_3 + 0.00036 * X_4 + 0.00051 * X_5 + 0.00078 * X_6 \geq 0.95$;
- ② $5785918 * X_1 + 595566 * X_2 + 2054002 * X_3 + 514283 * X_4 + 682293 * X_5 + 114111 * X_6 \leq 94309927$;
- ③, ④는 F-16과 동일

엔진의 초기 도입시 적정 재고는 현재 도입된 재고와 비교하여 <표 7>과 <표 8>과 같이 정리하였다.

F-16의 경우, 엔진 3개, core 2개, aug 33개, gbx 33개를 도입하고, fan, FDT는 각각 1개씩 도입하는 것이 적정하다고 산출되었다. 초기도입 비용은 약 3,755만불로 현재고 도입비용보다 약 72만불이 적게 들었고, 운용가용도는 90.33%로 현재 재고를 보유하는 것(<표 3>의 시나리오 65에서 운용가용도 84.38%) 보다 운용가용도가 5.95% 증가하여 목표 운용가용도를 충족할 수 있다.

KF-16의 경우, 엔진 14개, fan 2개, aug 2개, gbx 68개를 도입하고, core와 FDT는 각각 1개씩 도입하는 것이 적정하다고 산출되었다. 초기도입 비용은 약 9,356만불로 현재고 도입시보다 약 75만불이 적게 들었고, 운용가용도는 95.01%로 목표 운용가용도를 충족할 수 있다.

<표 7> F-16 초기 도입시 적정 재고

구분	엔진	fan	core	FDT	aug	gbx	운용 가용도	전체 비용(\$)	비용 차이
현재 고	4	5	8	5	6	5	0.8438	38,226,408	-
초기 도입	3	1	2	1	33	33	0.9033	37,549,854	-716,554

<표 8> KF-16 초기 도입시 적정 재고

구분	엔진	fan	core	FDT	aug	gbx	운용 가용도	전체 비용(\$)	비용 차이
현재 고	9	12	12	13	4	9	0.9464	94,309,927	-
초기 도입	14	2	1	1	2	68	0.9501	93,886,399	-423,528

5. 결 론

본 연구는 엔진과 모듈의 재고수준이 항공기 운용가용도에 미치는 영향력을 조사함으로써 이들의 최적 재고수준을 결정하고자 하였다. 이를 위해 항공기 운용가용도를 측정하는 시뮬레이션 모형을 개발하고 이를 메타다중회귀모형과 정수계획모형으로 결합하였다.

연구 결과에 대한 발견점과 시사점은 다음과 같다. 첫째, 메타모델에서 도출된 엔진 및 모듈의 효과지수를 통해 운용가용도에 가장 큰 영향을 미치는 품목을 발견할 수 있다. 가장 큰 영향을 미치는 것은 예비엔진 수량이며, 모듈의 경우는 core 모듈 수량이었다. 이 방법을 통해 어느 품목에 대해 중점 재고관리를 할 것인지 식별할 수 있다. 둘째, 정수계획 모형을 통해 주어진 예산 범위 내에서 최적 재고수준을 산출할 수 있다. 최적 재고수준을 발견함으로써 목표 운용가용도는 달성하면서도 불필요한 재고의 구매를 방지할 수 있으며 궁극적으로 경제적 균 운영을 도모할 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] 공군본부(2007), 「항공기 정비관리(공군교범 5-51)」, 대한민국 공군.

[2] 우제웅(2000), 「항공기 예비기관/모듈 적정소요 산정 모형 연구」, 국방논집 제00-49호, 한국국방연구원.

[3] 정일한, 윤원영(2008), “가용도 제약하에 MME 시스템에서 유전알고리즘과 시뮬레이션을 이용한 수리부속 최적화” 「품질경영학회지」, 36권, 2호, pp.9-19.

[4] 정일한, 윤원영, 김호균(2009), “가용도 제약하에 시뮬레이션과 메타 휴리스틱을 이용한 MME 시스템의 수리수준 및 수리부속 할당 동시 최적화”, 「경영과학」, 26권, 1호, pp.209-223.

[5] Banks, J., J. Carson, B. Nelson, D. Nicol(2005), *Discrete-Event System Simulation*, Prentice Hall, New Jersey.

[6] Keijne, J.(1992), “Regression Metamodels for Simulation with Common Random Numbers: Comparison of Validation Tests and Confidence Intervals”, *Management Science*, Vol.38, No.8, pp.1164-1185.

[7] Muckstadt, J.(1973), “A Model for Multi-item, Multi-echelon, Multi-indenture Inventory System,” *Management Science*, Vol.20, pp.472-481.

[8] O'Malley, T.(1983), “The Aircraft Availability Model: Conceptual Framework and Mathematics,” *Technical Report AF201*, Logistics Management Institute, Washington, D.C..

[9] Robinson, S.(2004), *Simulation: The Practice of Model Development and Use*, John Wiley & Sons, Ltd., England.

[10] Sanchez, S.(2008), “Better than a Petaflop: The Power of Efficient Experimental Design”, *2008 Winter Simulation Conference*, Monterey, CA.

[11] Sherbrooke, C.C.(1968), “METRIC: A Multi-echelon Technique for Recoverable Item Control,” *Operations Research*, Vol.16, pp. 122-141.

[12] Sherbrooke, C.C.(1986), “VARI-METRIC: Improved Approximations for Multi-indenture, Multi-Echelon Availability Models,” *Operations Research*, Vol.34, No.2, pp.311-319.

[13] Slay, F. M., et. al.(1996), “Optimizing Spares Support: The Aircraft Sustainability Model,” *Technical Report AF501MRI*, Logistics Management Institute, Washington, D.C..

[14] Slay, F. M.(1980), “VARI-METRIC: An approach to modeling multi-echelon resupply when the demand process is Poisson with a Gamma prior,” *Technical Report AF301-3*, Logistics Management Institute, Washington, D.C..