

# 항공기 예비엔진 및 모듈 재고수준이 전시 운용가용도에 미치는 영향

김진호<sup>1</sup> · 이상진<sup>2</sup> · 정성태<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>대한민국 공군소령, <sup>2</sup>국방대학교 국방관리학과

## The Impact of Aircraft Spare Engine and Module Inventory Level on Wartime Operational Availability

Jinho Kim<sup>1</sup> · Sangjin Lee<sup>2</sup> · Sungtae Jung<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Major in Republic of Korea Air Force

<sup>2</sup>Defence Management, Korea National Defense University

### ■ Abstract ■

It is important to maintain on operational availability of aircraft during wartime. The KF-16 fighter, the backbone of the ROKAF (Republic Of Korea Air Force), has a single engine. Therefore, the engine has a critical influence on operational availability. The purpose of this study is to estimate optimal levels of spare part inventories concerning both engines and modules. That is provided by linear programming methods utilizing a developed meta-model. For drawing out the meta-model, we develop a simulation model which can consider wartime demands. In the previous study, 2<sup>k</sup> factorial design method is used to check the influence of each independent variable. That method requires relatively many scenarios because every extreme value combination of independent variables should be checked. However, this study adopts NOLH (Nearly Orthogonal Latin Hypercube) as an experimental design. By adopting NOLH, this study increases not only efficiency but also accuracy. That is proven by comparing the validity of the developed meta-model on both experimental designs. This study also utilizes the OptQuest simulation tool in ARENA to derive the optimal level of spare stocks. By comparing the result of OptQuest to that of the developed meta-model, the validity of this study is secured.

Keywords : Optimal Inventory Level, Simulation, Experimental Design, Operational Availability

논문접수일 : 2014년 01월 27일    논문게재확정일 : 2014년 04월 25일

논문수정일 : 1차(2014년 03월 12일), 2차(2014년 04월 22일)

† 교신저자, [stjung79@gmail.com](mailto:stjung79@gmail.com)

## 1. 서 론

항공력은 전쟁 승패에 핵심적인 요인 중 하나이며 전시 항공기 운용가용도를 유지하는 것은 중요한 문제이다. 한국 공군의 주력전투기인 KF-16은 단발엔진으로 구성되어 있으며 항공기 특성상 엔진이 항공기 전체 운용가용도에 미치는 영향은 크다. 공군은 엔진 결함발생과 계획정비에 따른 항공기 불가동을 최소화하기 위해 항공기 장착엔진 이외의 추가 예비엔진 및 모듈을 운영하도록 규정하고 있다. 그러나 모듈형 엔진의 경우에는 예비재고에 대한 뚜렷한 기준이 없고 제작사의 추천에 의존하고 있다[2].

항공기 가용도를 고려한 적정재고수준을 산정하기 위해서 많은 연구가 진행되어 왔다. 재고수준에 대한 연구는 크게 분석적 모형과 시뮬레이션 모형을 통해 이루어졌다. 분석적 모형은 그 적용이 쉽고 상대적으로 빠른 시간에 결과를 도출하는 장점이 있어, Sherbrooke에 의해 METRIC 모형이 개발된 이후 그 가정사항을 완화하는 방향으로 지속적으로 발전되어 왔다[15]. O'Malley[11]는 창과 기지에 재고를 보유하는 다단계 재고시스템을 Vari-METRIC[16]의 수요예측 방법과 항공기 가용도를 목적함수로 사용하여 비용과 항공기 가용도를 고려한 적정재고수준을 결정할 수 있는 분석적 모형인 AAM(Aircraft Availability Model)을 개발하였다. 그러나 AAM은 시간에 관계없는 확정적인 값을 사용하므로 전시와 같은 동적인 상황에 적용하기는 제한이 있었다. 미 군수관리연구소(LMI : Logistics Management Institute)는 AAM을 기반으로 전시 개념을 추가하여 ASM(Aircraft Sustainability Model)을 개발하였다. ASM은 변동수요가 발생하는 전시 예산계약하에서 항공기 목표가동률을 유지하기 위한 적정수리부속 소요를 산정할 수 있다[17]. 그러나 ASM은 구조가 복잡하고 모형의 운용을 위해서는 방대한 양의 신뢰성 있는 자료를 요구하므로 현재 한국 공군에서는 ASM이 아닌 SLAM(Spare Level by an Availability Method) 모형을 적용하고 있다. SLAM은 공군 군수사에서 AAM을 참고하여 개발

하였으며, 예산계약하에서 목표가동률을 유지하기 위한 적정수리부속 소요를 산정하고 있다. SLAM은 수리부속의 계층구조를 엔진과 모듈은 상위 계층, 기타 부품은 하위 계층으로 구성되는 2단계 계층 구조에서 소요를 산출하는 모형이다. 하지만, SLAM은 항공기 예비엔진 및 모듈에 대한 소요 산출보다는 모듈을 구성하는 수리부속 소요 산출에 적합한 것으로 평가되고 있다[5].

이춘섭, 우제웅[5]은 Vari-METRIC 모형을 기반으로 항공기 예비기관 및 모듈의 적정소요 산출에 대한 연구를 통해 수리부속이 아닌 엔진과 모듈 단위의 적정재고수준 산정할 수 있는 다단계 모형을 제시하였으나, METRIC 계열 모형이 가지는 가정사항을 여전히 필요로 한다. METRIC 계열 모형은 운용가용도 계산에서 예방정비 시간을 고려하지 않고, 정비 및 수송시간 등에 대해 확정적 값을 필요로 하며, 정비체계 내에서 품목의 고장이 포아송 분포가 아닌 일반분포를 따르는 경우에는 모형의 적용이 제한된다. 실제 엔진정비의 경우, 고장에 의한 비계획정비보다는 예방정비인 계획정비로 인한 불가동이 많고 정비 및 수송시간 등에 대한 편차가 상당히 크며, 품목 특성에 따라 포아송분포의 적용이 어려운 모듈이 있다.

이와 같이 분석적 모형의 적용을 위해서는 엄격한 가정사항을 필요로 하는 문제점 때문에 이를 완화하여 현실적인 적정재고수준을 산정하기 위해 시뮬레이션 모형이 이용되었다. 시뮬레이션 모형은 수리부속 수요나 수송시간 등이 다양한 분포를 따르는 경우라도 그 적용이 가능하며, 예방정비와 수리부속 대기시간 등의 다양한 정비절차를 표현할 수 있다는 장점이 있기 때문이다[3].

Stears III[19]는 수리부속의 계층구조를 반영한 시뮬레이션 모형을 통해 항공모함에 탑재된 F-18 항공기를 대상으로 비용을 최소화 할 수 있는 예비모듈의 적정재고수준 판단을 연구하였다. 엔진정비 실적자료를 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 도출된 결과값에 대한 다중회귀분석을 통해 메타모형을 개발하였으며 이를 이용하여 적정재

고수준을 판단하였다. Köchel and Nieländer[10]은 시뮬레이션과 유전알고리즘을 이용하여 목표 운용가용도를 만족하면서 수요분포와 주문정책을 고려한 적정재고수준을 도출하였다. 정일한, 윤원영[6]도 가용도 제약하에서 수리부속 최적화를 위해 시뮬레이션과 유전알고리즘을 사용하였다. 하지만, 유전알고리즘을 통한 최적화는 많은 시간을 필요로 하는 제한이 있었다. Tao and Wen[20]은 METRIC 모델의 제한사항이었던 수리시간, 주문 및 수송시간에 대한 다양한 분포를 시뮬레이션 모델에 적용하여 수리부속의 적정재고수준을 산출하였다. 이를 통해 METRIC 모델의 결과와 비교하여 수리부속 최적화 방법으로 시뮬레이션을 이용하는 것이 더 효과적임을 제시하였다. 이상진 등[3]은 Steans III의 연구를 기반으로 KF-16 항공기의 적정재고수준에 관한 연구를 수행하였다. 엔진과 모듈의 적정재고수준의 결정은  $2^k$  인자 시뮬레이션 실험설계법을 통해 개발한 메타모델을 결합한 방법을 사용하였고 비용, 목표 운용가용도, 최소재고 등 다수의 제약조건을 추가한 선형계획모형을 통해 적정재고수준을 산출하였다. Qizhi and Bin[13]은 다단계 재고모형에서 고장률이 포아송분포가 아닌 일반분포인 경우를 반영하는 시뮬레이션 모형을 제시하였고 적정재고수준 산출은 ARENA 시뮬레이션의 OptQuest를 활용하였다.

선행연구를 종합하면 분석적 다단계 재고모형의 적용은 엄격한 가정사항을 요구하기 때문에 시뮬레이션을 활용한 연구가 진행되었고, 시뮬레이션 모형에서 적정재고수준을 산출하기 위해 유전알고리즘,  $2^k$  인자 실험설계법을 통한 메타모델과 OptQuest가 사용되었다. 하지만, 예비엔진 및 모듈 재고수준 최적화에 관한 기존의 시뮬레이션 연구들은 전시 급격히 증가하는 정비소요를 고려하지 못했고, 최적화 방법들은 결과 산출까지 상대적으로 많은 시간이 소요되었다. 또한,  $2^k$  인자 실험설계법을 통해 개발된 메타모델은 선형계획모형을 적용하여 도출된 재고수준이 최적인지에 대한 적절성 검토가 이루어지지 않았다.

따라서, 본 연구는 전시 급증하는 정비소요를 고려한 시뮬레이션 모형을 개발하여 예비엔진과 모듈이 전시 목표 운용가용도에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 메타모델 개발을 위해서  $2^k$  인자 설계법과 NOLH(Nearly Orthogonal Latin Hypercube) 설계법을 비교하여 효율적인 방법을 제시한다. 또한 메타모델을 통해 도출된 적정재고수준과 ARENA OptQuest 결과를 비교하여 최적화된 재고수준을 도출한다.

## 2. 시뮬레이션 모형

본 연구는 실제 엔진정비체계를 기반으로 ARENA 14.0을 통해 시뮬레이션 모형을 구성하였고 과거 엔진정비실적 자료를 분석하여 입력 자료로 활용하였다. 또한 전시 운용가용도 산출을 위해 전시 정비소요를 산정하여 모형에 반영하였다. 주요 변수에 대한 민감도 분석을 통해 모형의 타당성을 검토하였다.

### 2.1 가정사항

전시 항공기 예비엔진 및 모듈 재고수준이 항공기 운용가용도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 KF-16 항공기의 F100-PW-229 엔진을 대상으로 하였다. 항공기 운용가용도에 영향을 미치는 계통에는 기계, 항전, 전기, 무장 등 엔진 외에 다른 계통에 의한 불가동도 많으나, 엔진이 미치는 영향이 가장 크기 때문이다[1]. 연구의 목적에 집중하고 모형의 간결성을 위해 시뮬레이션 모형에서 다음 사항을 가정하였다.

첫째, 신품 엔진이나 모듈의 단가가 높아서 정비 현장에서 품목을 재생하여 사용하므로 정비순환에서 어떤 엔진이나 모듈도 폐기되어 새로운 것으로 교체되지 않는다. 둘째, 부품 부족시 엔진이나 모듈의 동류전용(Cannibalization)은 정비규정에서 정한 바와 같이 허용하지 않는다. 동류전용을 허용할 경우 초기에는 운용가용도를 향상시키는 것 같으나 시스템 전체적으로는 부정적인 영향을

미치기 때문이다. 셋째, 본 연구는 엔진 및 모듈과 관련된 정비인 계획창정비, 비계획창정비, 기지정비 및 TCTO(Time Compliance Technical Order : 시한성기술지시)만을 포함한다. 1단계 정비인 부대정비는 사소한 결함에 대한 정비작업으로 예비엔진 및 모듈의 소요나 운용가용도와는 거의 관련이 없어 고려하지 않았다. 넷째, 목표 운용가용도는 다른 구성품의 정비소요는 고려하지 않고 엔진의 정비소요만을 고려하므로 실제보다 높은 95% 이상으로 설정한다[3]. 다섯째, 항공기 엔진 및 모듈의 창정비는 전시에도 동일하게 수행되기 때문에 전시 엔진 및 모듈의 정비절차는 평시와 차이가 없다고 가정한다. 여섯째, 운용가용도는 전시에 발생하는 항공기 손실에 따라 변화되지만 본 연구에서는 전시 정비소요에 따른 운용가용도 변화를 살펴보고 예비엔진과 모듈의 적정재고수준을 산정하는 것이 목표이기 때문에 전시 항공기 손실은 고려하지 않는다. 일곱째, 항공기 수리를 위한 수리자원은 충분하여 수리를 위한 대기는 발생하지 않는다. 정비능력에 대한 제한을 반영하기 위해서는 정비자원 수에 따른 정비시간자료가 구분되어서 획득되어야 하나 야전데이터는 이러한 구분없이 통합되어 있어 이를 분리하여 모형에 반영하기 제한되기 때문에 이를 가정사항에 포함하였다.

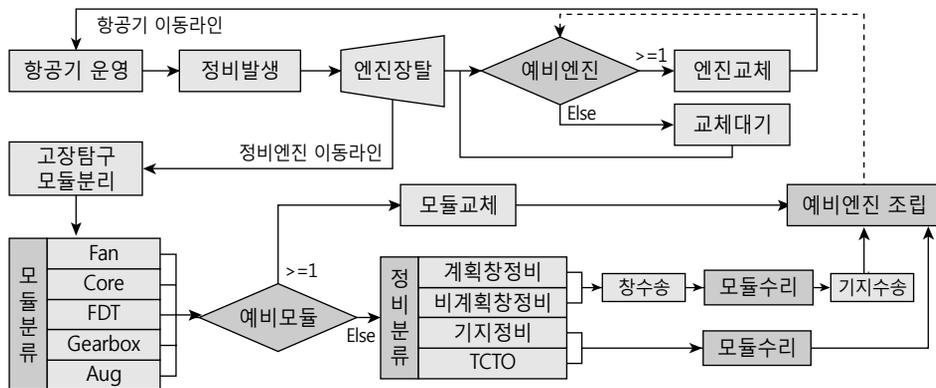
본 연구의 가정은 METRIC 기반 분석적 모형의 가정을 일부 완화하였다. METRIC 모형에서는 수리

부속의 수요율은 일정하다는 가정을 필요로 하나 본 연구는 급증하는 전시수요를 고려할 수 있어 수리부속의 수요가 일정하다는 가정을 완화하였다. 하지만 창과 기지의 수리능력의 제한, 고장품의 폐기, 수리부속의 유용금지 등과 같은 METRIC 모형의 기본가정은 여전히 모형의 실행을 위해서는 필요하다.

### 2.2 모형의 구성

KF-16의 F100-PW-229 엔진은 Fan, Core, FDT (Fan Drive Turbine), Augmentor(이하 Aug), Gearbox의 5개 모듈로 구성되어 있고 엔진의 정비는 결함 발생 및 예방정비에 따라 계획창정비, 비계획창정비, 기지정비, TCTO 정비로 분류되어 있다. 시뮬레이션 모형은 실제 엔진정비체계를 고려하여 가능한 유사하게 표현하였으며, 입력된 자료를 통해 항공기의 운용가용도를 산출할 수 있도록 구성하였다. 모형은 <그림 1>과 같이 크게 항공기 이동라인과 정비엔진 이동라인 두 가지로 구성하였다.

항공기 정비프로세스는 항공기 운영에 따라 엔진 고장이나 예방차원의 계획정비가 발생한다. 엔진의 정비소요가 발생하면, 해당 항공기는 불가동 상태가 되고 기지의 항공기 운용가용도는 낮아지게 된다. 불가동 엔진은 항공기에서 장탈되어 정비라인으로 이동되고, 항공기는 해당 기지에서 보유하고 있는 예비엔진의 수량을 확인하여 재고가 있으면 엔진



<그림 1> 시뮬레이션 모형 구성도

을 교체하여 다시 가동하고 재고가 없으면 예비엔진이 확보될 때까지 불가동 상태로 대기한다.

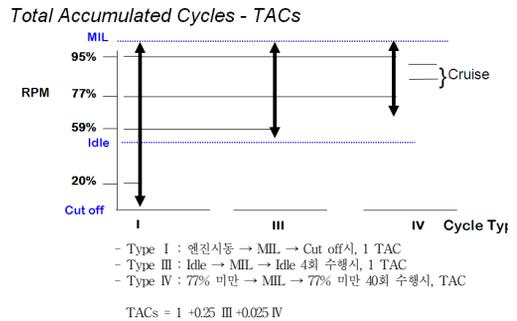
정비엔진 이동라인을 살펴보면 정비소요가 발생하여 항공기에서 장탈된 엔진은 야전정비시설에 입고되어 결합 발생 모듈을 식별하고 해당 모듈은 엔진에서 분리된다. 해당 모듈의 예비재고를 확인하여 재고가 있으면 모듈을 교체하고 재고가 없으면 대기한다. 엔진에서 분리된 모듈은 계획창정비, 비계획창정비, 기지정비, TCTO 중 하나의 정비 절차를 거쳐 수리를 받는다. 수리가 완료된 모듈은 다시 기지로 수송되고 예비엔진으로 조립된다. 결합이 아닌 계획정비는 예방정비시간이 도래한 엔진을 야전으로 입고시키고 입고검사를 거친 후 해당 모듈은 엔진에서 분리된다. 분리된 모듈은 창으로 발송하여 창정비를 수행하고 정비 후 기지로 이송하여 예비모듈로 저장된다. 수리 완료된 모듈은 다른 4개 모듈의 재고가 한 개 이상일 때 엔진으로 조립된다.

### 2.3 전시 정비소요 산정 공식

항공기 운용가용도는 정비간 평균시간(MTBM : Mean Time Between Maintenance)에 의해 영향을 받으며 이 시간이 작을수록 운용가용도도 낮아진다. 정비간 평균시간은 고장정비와 계획정비를 모두 포함한 평균시간으로 운영시간 동안 정비발생횟수가 증가할수록 작아진다. 전시 초기에는 평시 대비 비행소티(Sortie : 항공기 출격횟수)가 급격히 증가하므로 엔진의 스트레스가 증가하여 정비발생횟수가 많아질 것이다. 즉, 평시 대비 전시 소티증가계수를 통해 전시 정비소요를 판단할 수 있다.

KF-16 엔진 모듈의 수명관리란 TAC(Total Accumulated Cycle) 개념을 적용하고 있다(단, Gear-box는 제외). TAC는 엔진시동, 임무수행, Cut-Off 과정에서 엔진 주요부품의 고온·고압, 원심력 등의 응력 변화로 인한 피로도를 측정하는 수치이다 [12]. <그림 2>는 TAC를 산정하는 방식을 나타낸 것으로 엔진의 TAC는 Type I처럼 엔진의 시동 →

Cut-Off 횟수가 많고, Type III와 Type IV처럼 엔진의 추력 사용이 급격할수록 증가하고 엔진의 피로도는 높아진다. 비행소티의 증가는 항공기 출격 횟수와 임무횟수의 증가를 의미하므로, 엔진의 시동 → Cut-Off 횟수가 많아지고 엔진을 급격히 사용하는 횟수 또한 증가한다. 따라서 비행소티의 증가는 엔진의 피로도를 증가시키며 결국 엔진정비소요를 증가시킨다.



<그림 2> TAC 산정방식

미 공군의 실제 전쟁 경험 사례를 통해서도 비행소티 기준으로 정비소요를 예측하는 것이 적절함을 알 수 있다. 1991년 이라크 전쟁시 사막의 폭풍 작전에서 미 공군은 많은 비행시간을 고려하여 항공기 예비품의 수요를 예측하였으나 그 예상은 빗나갔다. 실제 수요보다 25% 이상 많게 예측된 품목비율을 살펴보면, F-15의 경우는 전체 품목 중 84%, F-16의 경우는 81%로 나타났다[15]. 이는 비행시간 기준으로 예비품 수요를 산출한 것이 과다예측이었음을 의미한다. 평시와 비교해서 소티당 비행시간은 훨씬 많았지만 소티수는 비슷했고 소티당 예비품 수요는 평시와 동일하게 나타났다. 이런 사례를 통해 예비품의 수요를 예측함에 있어서 비행시간보다 비행소티 기준이 더 바람직하다고 판단된다[18].

전시 엔진정비소요는 전시 운영소요량을 근거로 산출하는데, 이것은 공군이 2006년 수행한 전시 항공기 수리부속 소요산정 개념을 이용할 수 있다. 전시 수리부속 운영소요량은 항공기 운영 중 발생

하는 결함이나 창정비로 인한 수리부속 소모량을 의미한다. 전시 운영소요량에 영향을 미치는 요소는 평시 운영소요량과 작전단계별 일수 및 소티수이고 산정 공식은 다음과 같다[1].

**전시 운영소요량**

$$= \text{평시 비행소티당 소요량} \times \text{전시 단계별 일일 비행소티} \times \text{단계별 일수} + \text{전시 창정비 소요량}$$

전시 수리부속 운영소요량이 전시 비행소티수와 평시 정비발생 빈도에 따라 결정되는 것처럼 전시 엔진정비소요는 평시 엔진정비횟수와 전시 소티증가계수를 통해 산출할 수 있다. 본 연구에서는 평시 정비소요량에 창정비 소요량이 포함되어 있으므로 전시 창정비소요량을 따로 고려하지 않았다. 평시 정비소요량을 일일 엔진정비횟수로 표현하고 전시 단계별 일일 비행소티와 단계별 일수 대신 전시 일일 평균 소티증가계수를 적용하였다. 따라서 전시 엔진정비소요인 전시 일일 엔진정비횟수는 다음과 같은 식을 통해 구할 수 있다.

**전시 일일 엔진정비횟수**

$$= \text{평시 일일 엔진정비횟수} \times \text{전시 일일 평균 소티증가계수}$$

**2.4 시뮬레이션 입력 자료**

KF-16 엔진의 정비 자료는 2009년부터 2013년까지 5년간의 실적 자료를 활용하였다. <표 1>은 5년간 엔진 운용시간인 229,552.31시간동안 발생된

엔진의 각 모듈별 정비횟수를 종합한 것이다.

5년간 총 정비횟수는 655건으로 시간당 엔진정비횟수는 총 횟수를 운용시간으로 나누어 계산하고, 시간당 엔진 정비횟수에 일일 엔진작동시간을 곱해주면 평시 일일 정비횟수를 결정할 수 있다.

**평시 일일 엔진정비횟수**

$$= \text{평시 시간당 엔진정비횟수} \times \text{일일 엔진작동시간}$$

$$= \frac{655\text{건}}{229,552.31\text{시간}} \times 1.21023(\text{시간/일})$$

$$= 0.003453(\text{건/일})$$

※ 여기서, 일일 엔진작동시간은 엔진 총 운용시간을 엔진 총 운용일수와 항공기 대수로 나누어서 결정하였음.

평시 엔진정비횟수(0.003453건/일)와 전시 일일 평균 소티증가계수(2.1042)를 바탕으로, 엔진 1대당 전시 엔진정비횟수는 다음과 같다[1].

**전시 엔진정비횟수**

$$= \text{평시 일일 엔진정비횟수} \times \text{일일 평균 소티증가계수} = 0.003453 \times 2.1042 = 0.007266(\text{건/일})$$

전시 모듈의 정비종류별 정비소요 산출을 위해 각 모듈의 정비종류별 횟수를 각 모듈의 총 정비횟수로 나눠주면, <표 2>와 같이 모듈의 정비종류별 정비발생 비율을 구할 수 있다.

그 밖의 시뮬레이션 모형의 입력 변수인 정비시간(정비종류별 정비시간, 자재대기시간, 입·출고

<표 1> KF-16 엔진 모듈별 정비횟수

| 구 분     | 계획창정비 | 비계획창정비 | 기지정비 | TCTO | 계   |
|---------|-------|--------|------|------|-----|
| Fan     | 75    | 5      | 16   | 0    | 96  |
| Core    | 83    | 13     | 105  | 60   | 261 |
| FDT     | 88    | 0      | 29   | 13   | 130 |
| Aug     | 77    | 2      | 41   | 0    | 120 |
| Gearbox | 45    | 1      | 2    | 0    | 48  |
| 계       | 368   | 21     | 193  | 73   | 655 |

〈표 2〉 모듈의 정비종류별 정비발생 비율

| 구 분     | 계획 창정비 | 비계획 창정비 | 기지정비   | TCTO   | 계       |
|---------|--------|---------|--------|--------|---------|
| Fan     | 11.45% | 0.76%   | 2.44%  | 0.00%  | 14.66%  |
| Core    | 12.67% | 1.98%   | 16.03% | 9.16%  | 39.85%  |
| FDT     | 13.44% | 0.00%   | 4.43%  | 1.98%  | 19.85%  |
| Aug     | 11.76% | 0.31%   | 6.26%  | 0.00%  | 18.32%  |
| Gearbox | 6.87%  | 0.15%   | 0.31%  | 0.00%  | 7.33%   |
| 계       | 56.18% | 3.21%   | 29.47% | 11.15% | 100.00% |

〈표 3〉 정비시간에 대한 확률분포

(단위 : 일(Day))

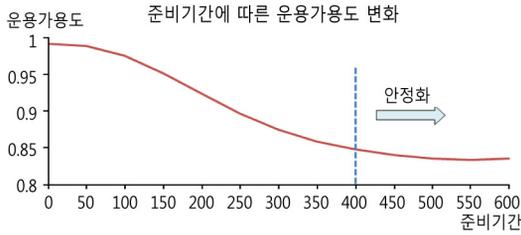
| 구 분               | Fan                               | Core                           | FDT                             | Gearbox               | Aug                          |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 계획 창정비            | 52+EXPO<br>(60.7)                 | 63+WEIB<br>(83.1, 1.42)        | 36+169×BETA<br>(0.851, 1.48)    | 22+EXPO<br>(58.8)     | 9+WEIB<br>(184, 1.23)        |
| 비계획 창정비           | 18.5+78×BETA<br>(0.201, 0.19)     | 26.5+89×BETA<br>(0.644, 0.887) |                                 |                       | 4.5+95×BETA<br>(0.25, 0.365) |
| 기지정비              | 0.999+EXPO<br>(35.8)              | 0.999+WEIB<br>(21, 0.549)      | 0.999+WEIB<br>(15.2, 0.329)     | EXPO(1)               | 0.999+WEIB<br>(0.811, 0.255) |
| TCTO              | -                                 | 0.999+WEIB<br>(6, 0.319)       | 2+WEIB<br>(39.5, 0.582)         | -                     | -                            |
| 자재대기<br>(계획 창정비)  | -0.001+277×BETA<br>(0.698, 0.623) | 21+404×BETA<br>(0.656, 0.804)  | -0.001+311×BETA<br>(1.32, 1.12) | -0.001+EXPO<br>(36.2) | -                            |
| 자재대기<br>(비계획 창정비) | UNIF<br>(-0.001, 141)             | -0.5+65×BETA<br>(0.297, 0.443) |                                 |                       | -                            |
| 입고대기              | 2+GAMM(9.7, 1.74)                 |                                |                                 |                       | -                            |
| 출고대기              | -0.5+LOGN(7.39, 7.44)             |                                |                                 |                       | -                            |

대기시간 등)에 대한 확률분포는 5년간 정비시간 자료를 바탕으로 Arena의 입력분석기를 사용하여 추정하였고 결과는 <표 3>과 같다. 표에서 공란으로 되어있는 부분은 해당 모듈에 TCTO가 1건도 발생하지 않았기 때문이고 Aug 모듈은 기지에서 창정비를 수행하므로 자재대기시간과 입·출고대기시간을 모델에서 묘사하지 않았기 때문이다.

### 3. 시뮬레이션 실행 및 메타모델 개발

본 연구의 목적은 전시 목표 운용가용도를 고려한 예비엔진 및 모듈의 적정재고수준을 산정하는 것이므로 비행소티가 급격히 증가하는 전쟁 초기 60일의 결과가 중요하다. 따라서 본 연구는 전쟁기

간을 60일, 준비기간을 400일, 반복횟수를 200회로 설정하고 시뮬레이션을 실행하였다. 적절한 준비기간을 찾기 위해서 준비기간을 50일씩 증가시켜 시뮬레이션을 수행하였고 준비기간에 따라 운용가용도가 어떻게 변화하는 지를 살펴보았다. <그림 3>은 준비기간에 따른 운용가용도 변화를 나타내는 것이며, 준비기간이 증가할수록 초기편의가 제거되어 일정한 값에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 약 400일 이후부터는 운용가용도가 안정적인 값에 수렴하여 초기편의가 제거된 것으로 보고 준비기간을 설정하였다. 이와 유사하게 시뮬레이션 반복횟수 또한 5회를 단위로 300회까지 증가시켜 실험한 결과 200회 이상부터는 변동없이 안정된 값을 산출하기 때문에 시뮬레이션 반복횟수는 200회로 설정하였다[9].



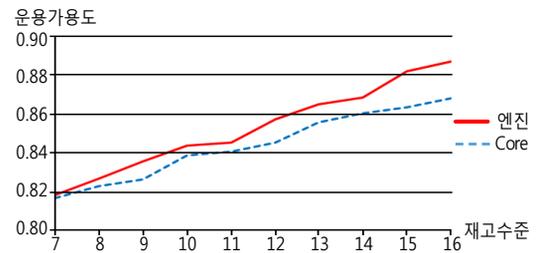
〈그림 3〉 준비기간에 따른 운용가용도 변화

KF-16 항공기를 운용하고 있는 B기지가 현재 보유하고 있는 예비엔진은 11개, 예비모듈은 Fan 12개, Core 12개, FDT 13개, Gearbox 9개, Aug 4 개이다. 시뮬레이션 실행결과, 전시 운용가용도는 평균 84.86%로 나타나 전시 급격히 증가하는 정비소요를 고려할 때 현 재고수준은 부족한 것으로 나타났다. 예비엔진과 모듈의 재고수준이 전시 운용가용도에 미치는 영향을 구체적으로 살펴보고, 최적화 모형을 도출하기 위해서 시뮬레이션 실행 결과를 바탕으로 메타모형을 개발하였다. 이때 효과적이고 정확한 메타모형을 개발하기 위해 2<sup>k</sup> 인자 실험설계법과 NOLH 기법을 비교하였다.

### 3.1 타당성 검토

시뮬레이션 모형에 기반한 의사결정은 모형의 타당성에 달려있다. 민감도 분석은 대표적인 타당성 검토 방법인데, 모형의 변수 값을 변화시키고 그 변화로 야기되는 결과를 분석하여 모형의 타당성을 살펴보는 방법이다[4, 9]. 본 연구모형의 주요 변수는 예비엔진과 모듈의 재고수준이다. 특히, 정비간 평균시간이 가장 적은 엔진과 Core 모듈의

재고수준이 항공기 운용가용도에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 엔진과 Core 재고수준에 따른 운용가용도 변화를 살펴보기 위해 나머지를 모두 현 재고로 고정한 상태에서 엔진과 Core 모듈의 재고를 각각 7~16개까지 변화시켜 운용가용도를 도출하였다. 결과는 <표 4>와 같고 <그림 4>는 이를 그래프로 나타낸 것이다. 엔진과 Core 재고의 증감에 따라 운용가용도가 적절하게 반응하는 것을 볼 수 있다.

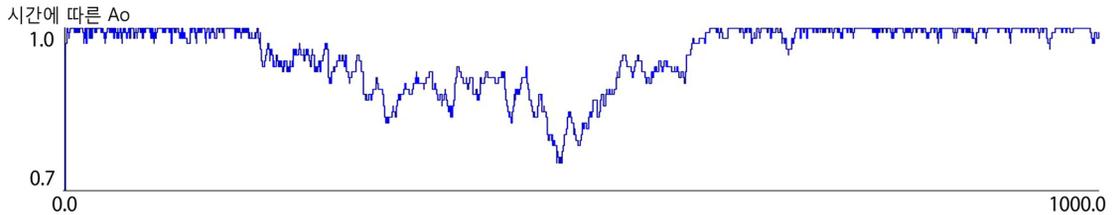


〈그림 4〉 엔진 및 Core 재고수준에 따른 운용가용도

또한 정비소요를 의미하는 정비발생 시간간격에 따라 운용가용도가 적절히 산출되는지 살펴볼 필요가 있다. 운용가용도에 있어서 정비소요는 중요한 영향 요인이기 때문이다. 정비소요에 대한 운용가용도 변화를 살펴보기 위해 460일 이후에는 전시가 아닌 평시 정비소요를 반영하여 1,000일 동안의 운용가용도 변화를 살펴보았고 그 결과는 <그림 5>와 같다. 전시 정비소요에서 운용가용도는 급격하게 떨어지다가 다시 평시 정비소요를 반영하였을 때는 운용가용도가 상승하여 평시 수준으로 복원되는 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구모형이

〈표 4〉 엔진 및 Core 재고수준에 따른 운용가용도

| 구 분  | 재고수준   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | 7  | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     |
| 엔진   | 0.8184   | 0.8266 | 0.8355 | 0.8438 | 0.8454 | 0.8572 | 0.8651 | 0.8684 | 0.8820 | 0.8870 |
| Core | 0.8167   | 0.8228 | 0.8264 | 0.8387 | 0.8407 | 0.8454 | 0.8555 | 0.8602 | 0.8634 | 0.8679 |
| 현 재고 | 엔진 11, Core 12, Fan 12, FDT 13, Aug 4, Gearbox 9 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |



〈그림 5〉 정비소요 변화에 따른 운용가용도 변화

운용가용도에 대한 정비소요의 영향을 잘 반영하고 있음을 보여준다.

### 3.2 메타모델 개발을 위한 실험설계법

메타모델은 시뮬레이션 결과물을 다중회귀분석하여 그 결과로 도출된 선형 회귀방정식으로 시뮬레이션 결과를 얻기 위해 어떤 설계법을 사용하느냐에 따라 차이가 있다. 정확한 메타모델을 도출하기 위해서는 가능한 모든 시나리오에 대해 시뮬레이션을 수행하는 것이 바람직하지만 이는 현실적으로 불가능하기 때문에 효과적인 실험설계가 필요하다.

기존 연구에서 사용된 실험설계법은  $2^k$  인자 실험설계법( $2^k$  Factorial Design)으로 2는 실험영역의 수준을 나타내며 k는 요인의 수이다[14]. 본 연구에서 독립변수는 엔진과 5개의 모듈이므로 요인의 수(k)는 6이고 요구되는 시나리오 개수는  $64(=2^6)$  개가 된다.  $2^k$  인자 실험설계법은 실험영역의 2가지 수준이 큰 차이를 가지는 값일 경우 실험영역 내부를 표현하지 못하므로 전체 실험영역을 반영하지 못한다는 문제점이 있다. 또한 이를 해결하기 위해 실험영역의 수준을 늘린다면 시나리오 수가 급격하게 증가하는 문제점이 발생한다.

NOLH(Nearly Orthogonal Latin Hypercube)는 기존의 LHD(Latin Hypercube Design)가 직교성에 의한 표본추출로 극단값을 포함하는 방법과 Uniform Design이 전 표본영역에서의 고른 표본추출이 가능하다는 장점을 결합하여 발전시킨 실험설계법이다[8]. 이는 평시 운용과 전시 극한 상황까지 대비해야 하는 군의 특성에 적합한 실험설계법으로 미 해군대학원의 SEED Center에서 개발한 방법이다.

NOLH는 각 표본이 직교성을 가지고 있기 때문에 다중공선성의 문제가 발생하지 않고, 적은 표본 수를 가지고 전체 실험영역을 표현할 수 있기 때문에 효율적인 실험설계법이다. 독립변수가 6개인 본 연구에서  $2^k$  인자 실험설계법은 64가지의 시나리오를 요구하지만 NOLH 기법은 단지 17개만을 필요로 한다. 어떤 실험설계법이 효과적이며 더욱 정확한 메타모델을 도출하는지는 시뮬레이션 실행 결과와 개발된 메타모델의 유효성을 비교함으로써 판단할 수 있다.

### 3.3 시뮬레이션 실행 결과

시뮬레이션 모형에서 측정하고자 하는 것은 엔진과 5개 모듈의 재고수준별 시나리오에 따른 운용가용도와 총 소요비용이다.  $2^k$  인자 실험설계법에서 실험영역 2가지 수준은 엔진과 모듈 재고수준에 대한 하한선과 상한선이며, 하한선은 현 재고수준으로 설정하였고 상한선은 엔진 15개, 모듈은 30개로 설정하였다. 하한선을 현 재고수준으로 설정한 이유는 본 연구의 목적이 운영유지단계에서의 적정재고수준을 산정하고 현 재고에서 추가로 확보해야 할 재고량을 판단하기 위한 것이기 때문이다. 상한선을 엔진만 15개로 설정한 이유는 엔진의 단가가 모듈에 비해 훨씬 높기 때문에 예산의 제약을 고려해서 판단한 것이다.  $2^k$  인자 기법을 이용한 64가지 시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과는 <표 5>와 같다.

NOLH를 이용한 실험설계에서도 독립변수의 하한선과 상한선은  $2^k$  인자 실험설계법과 동일하게 적용하여 시뮬레이션을 실행 결과는 <표 6>과 같다.

〈표 5〉 2<sup>k</sup> 인자 실험설계법에 의한 시뮬레이션 결과

| 순번 | 재고수준 |     |      |     |     |     | 운용가용도  |        |        | 비용<br>(\$ 1,000) |
|----|------|-----|------|-----|-----|-----|--------|--------|--------|------------------|
|    | 엔진   | Fan | Core | FDT | Aug | G/B | 평균     | 표준편차   | 95% CI |                  |
| 1  | 11   | 12  | 12   | 13  | 4   | 9   | 0.8454 | 0.0384 | 0.0053 | 104,541          |
| 2  | 11   | 12  | 12   | 13  | 4   | 30  | 0.8458 | 0.0380 | 0.0053 | 107,006          |
| 3  | 11   | 12  | 12   | 13  | 30  | 9   | 0.8499 | 0.0405 | 0.0056 | 121,325          |
| 4  | 11   | 12  | 12   | 13  | 30  | 30  | 0.8504 | 0.0400 | 0.0056 | 123,791          |
| 5  | 11   | 12  | 12   | 30  | 4   | 9   | 0.8495 | 0.0442 | 0.0062 | 112,442          |
| 6  | 11   | 12  | 12   | 30  | 4   | 30  | 0.8500 | 0.0439 | 0.0061 | 114,908          |
| 7  | 11   | 12  | 12   | 30  | 30  | 9   | 0.8588 | 0.0422 | 0.0059 | 129,227          |
| 8  | 11   | 12  | 12   | 30  | 30  | 30  | 0.8591 | 0.0421 | 0.0059 | 131,693          |
| 9  | 11   | 12  | 30   | 13  | 4   | 9   | 0.8942 | 0.0343 | 0.0048 | 157,109          |
| 10 | 11   | 12  | 30   | 13  | 4   | 30  | 0.8938 | 0.0343 | 0.0048 | 159,574          |
| 11 | 11   | 12  | 30   | 13  | 30  | 9   | 0.9016 | 0.0377 | 0.0053 | 173,894          |
| 12 | 11   | 12  | 30   | 13  | 30  | 30  | 0.9009 | 0.0373 | 0.0052 | 176,359          |
| 13 | 11   | 12  | 30   | 30  | 4   | 9   | 0.9157 | 0.0301 | 0.0042 | 165,010          |
| 14 | 11   | 12  | 30   | 30  | 4   | 30  | 0.9158 | 0.0300 | 0.0042 | 167,476          |
| 15 | 11   | 12  | 30   | 30  | 30  | 9   | 0.9347 | 0.0350 | 0.0049 | 181,795          |
| 16 | 11   | 12  | 30   | 30  | 30  | 30  | 0.9348 | 0.0353 | 0.0049 | 184,261          |
| 17 | 11   | 30  | 12   | 13  | 4   | 9   | 0.8477 | 0.0405 | 0.0057 | 116,443          |
| 18 | 11   | 30  | 12   | 13  | 4   | 30  | 0.8483 | 0.0402 | 0.0056 | 118,909          |
| 19 | 11   | 30  | 12   | 13  | 30  | 9   | 0.8519 | 0.0421 | 0.0059 | 133,228          |
| 20 | 11   | 30  | 12   | 13  | 30  | 30  | 0.8527 | 0.0415 | 0.0058 | 135,694          |
| 21 | 11   | 30  | 12   | 30  | 4   | 9   | 0.8493 | 0.0454 | 0.0063 | 124,345          |
| 22 | 11   | 30  | 12   | 30  | 4   | 30  | 0.8499 | 0.0450 | 0.0063 | 126,810          |
| 23 | 11   | 30  | 12   | 30  | 30  | 9   | 0.8581 | 0.0469 | 0.0065 | 141,130          |
| 24 | 11   | 30  | 12   | 30  | 30  | 30  | 0.8581 | 0.0468 | 0.0065 | 143,595          |
| 25 | 11   | 30  | 30   | 13  | 4   | 9   | 0.9042 | 0.0375 | 0.0052 | 169,011          |
| 26 | 11   | 30  | 30   | 13  | 4   | 30  | 0.9041 | 0.0378 | 0.0053 | 171,477          |
| 27 | 11   | 30  | 30   | 13  | 30  | 9   | 0.9132 | 0.0396 | 0.0055 | 185,796          |
| 28 | 11   | 30  | 30   | 13  | 30  | 30  | 0.9136 | 0.0382 | 0.0053 | 188,262          |
| 29 | 11   | 30  | 30   | 30  | 4   | 9   | 0.9337 | 0.0317 | 0.0044 | 176,913          |
| 30 | 11   | 30  | 30   | 30  | 4   | 30  | 0.9338 | 0.0317 | 0.0044 | 179,379          |
| 31 | 11   | 30  | 30   | 30  | 30  | 9   | 0.9732 | 0.0271 | 0.0038 | 193,698          |
| 32 | 11   | 30  | 30   | 30  | 30  | 30  | 0.9727 | 0.0265 | 0.0037 | 196,163          |
| 33 | 15   | 12  | 12   | 13  | 4   | 9   | 0.8820 | 0.0427 | 0.0060 | 123,405          |
| 34 | 15   | 12  | 12   | 13  | 4   | 30  | 0.8819 | 0.0426 | 0.0059 | 125,871          |
| 35 | 15   | 12  | 12   | 13  | 30  | 9   | 0.8759 | 0.0435 | 0.0061 | 140,190          |
| 36 | 15   | 12  | 12   | 13  | 30  | 30  | 0.8771 | 0.0431 | 0.0060 | 142,656          |
| 37 | 15   | 12  | 12   | 30  | 4   | 9   | 0.8837 | 0.0469 | 0.0065 | 131,307          |
| 38 | 15   | 12  | 12   | 30  | 4   | 30  | 0.8832 | 0.0469 | 0.0065 | 133,773          |
| 39 | 15   | 12  | 12   | 30  | 30  | 9   | 0.8788 | 0.0459 | 0.0064 | 148,092          |
| 40 | 15   | 12  | 12   | 30  | 30  | 30  | 0.8793 | 0.0450 | 0.0063 | 150,558          |
| 41 | 15   | 12  | 30   | 13  | 4   | 9   | 0.9275 | 0.0337 | 0.0047 | 175,974          |
| 42 | 15   | 12  | 30   | 13  | 4   | 30  | 0.9278 | 0.0335 | 0.0047 | 178,439          |
| 43 | 15   | 12  | 30   | 13  | 30  | 9   | 0.9346 | 0.0344 | 0.0048 | 192,758          |
| 44 | 15   | 12  | 30   | 13  | 30  | 30  | 0.9337 | 0.0338 | 0.0047 | 195,224          |
| 45 | 15   | 12  | 30   | 30  | 4   | 9   | 0.9486 | 0.0292 | 0.0041 | 183,875          |
| 46 | 15   | 12  | 30   | 30  | 4   | 30  | 0.9487 | 0.0295 | 0.0041 | 186,341          |
| 47 | 15   | 12  | 30   | 30  | 30  | 9   | 0.9642 | 0.0286 | 0.0040 | 200,660          |
| 48 | 15   | 12  | 30   | 30  | 30  | 30  | 0.9637 | 0.0289 | 0.0040 | 203,126          |
| 49 | 15   | 30  | 12   | 13  | 4   | 9   | 0.8853 | 0.0442 | 0.0062 | 135,308          |
| 50 | 15   | 30  | 12   | 13  | 4   | 30  | 0.8852 | 0.0441 | 0.0061 | 137,774          |
| 51 | 15   | 30  | 12   | 13  | 30  | 9   | 0.8773 | 0.0462 | 0.0064 | 152,093          |
| 52 | 15   | 30  | 12   | 13  | 30  | 30  | 0.8783 | 0.0457 | 0.0064 | 154,558          |
| 53 | 15   | 30  | 12   | 30  | 4   | 9   | 0.8889 | 0.0493 | 0.0069 | 143,210          |
| 54 | 15   | 30  | 12   | 30  | 4   | 30  | 0.8885 | 0.0494 | 0.0069 | 145,675          |
| 55 | 15   | 30  | 12   | 30  | 30  | 9   | 0.8814 | 0.0482 | 0.0067 | 159,995          |
| 56 | 15   | 30  | 12   | 30  | 30  | 30  | 0.8818 | 0.0482 | 0.0067 | 162,460          |
| 57 | 15   | 30  | 30   | 13  | 4   | 9   | 0.9361 | 0.0382 | 0.0053 | 187,876          |
| 58 | 15   | 30  | 30   | 13  | 4   | 30  | 0.9358 | 0.0382 | 0.0053 | 190,342          |
| 59 | 15   | 30  | 30   | 13  | 30  | 9   | 0.9417 | 0.0394 | 0.0055 | 204,661          |
| 60 | 15   | 30  | 30   | 13  | 30  | 30  | 0.9421 | 0.0388 | 0.0054 | 207,127          |
| 61 | 15   | 30  | 30   | 30  | 4   | 9   | 0.9668 | 0.0227 | 0.0032 | 195,778          |
| 62 | 15   | 30  | 30   | 30  | 4   | 30  | 0.9666 | 0.0230 | 0.0032 | 198,243          |
| 63 | 15   | 30  | 30   | 30  | 30  | 9   | 0.9849 | 0.0198 | 0.0028 | 212,563          |
| 64 | 15   | 30  | 30   | 30  | 30  | 30  | 0.9859 | 0.0181 | 0.0025 | 215,028          |

〈표 6〉 NOLH 실험설계법에 의한 시뮬레이션 결과

| 순번 | 재고수준 |     |      |     |     |     | 운용가용도  |        |        | 비용<br>(\$ 1,000) |
|----|------|-----|------|-----|-----|-----|--------|--------|--------|------------------|
|    | 엔진   | Fan | Core | FDT | Aug | G/B | 평균     | 표준편차   | 95% CI |                  |
| 1  | 12   | 30  | 27   | 19  | 28  | 14  | 0.9515 | 0.0330 | 0.0046 | 183,836          |
| 2  | 11   | 17  | 28   | 23  | 12  | 9   | 0.9501 | 0.0314 | 0.0044 | 164,387          |
| 3  | 12   | 20  | 13   | 17  | 25  | 22  | 0.8693 | 0.0433 | 0.0060 | 134,410          |
| 4  | 12   | 23  | 18   | 30  | 7   | 21  | 0.9064 | 0.0437 | 0.0061 | 145,301          |
| 5  | 14   | 29  | 20   | 15  | 4   | 16  | 0.9182 | 0.0358 | 0.0050 | 155,046          |
| 6  | 15   | 18  | 19   | 27  | 24  | 10  | 0.9402 | 0.0378 | 0.0053 | 167,352          |
| 7  | 14   | 15  | 30   | 18  | 15  | 27  | 0.9528 | 0.0330 | 0.0046 | 184,780          |
| 8  | 13   | 28  | 26   | 29  | 20  | 26  | 0.9673 | 0.0302 | 0.0042 | 185,201          |
| 9  | 13   | 21  | 21   | 22  | 17  | 20  | 0.9361 | 0.0400 | 0.0056 | 160,076          |
| 10 | 14   | 12  | 15   | 24  | 6   | 25  | 0.8940 | 0.0413 | 0.0058 | 135,733          |
| 11 | 15   | 26  | 14   | 20  | 22  | 30  | 0.9016 | 0.0439 | 0.0061 | 155,843          |
| 12 | 15   | 22  | 29   | 26  | 9   | 17  | 0.9793 | 0.0210 | 0.0029 | 189,875          |
| 13 | 14   | 19  | 24   | 13  | 27  | 18  | 0.9263 | 0.0376 | 0.0052 | 174,268          |
| 14 | 12   | 13  | 22   | 28  | 30  | 23  | 0.9281 | 0.0369 | 0.0051 | 164,523          |
| 15 | 11   | 24  | 23   | 16  | 11  | 29  | 0.9172 | 0.0376 | 0.0052 | 152,862          |
| 16 | 13   | 27  | 12   | 25  | 19  | 12  | 0.8751 | 0.0480 | 0.0067 | 139,505          |
| 17 | 13   | 14  | 17   | 14  | 14  | 13  | 0.8973 | 0.0385 | 0.0054 | 137,288          |

NOLH 기법은 비록 17개의 시나리오를 수행하지만 각 독립변수별로 극단값을 포함하여 실험영역 전반에 걸쳐 표본이 고르게 추출되고 있다. 메타모형을 도출하기 위한 실험설계법이기에 때문에 결과 값 자체만으로는 그 효과성을 측정하기는 어렵다. 하지만 각 시나리오별 200회씩을 실험하는 대규모 시뮬레이션의 경우 NOLH 실험설계법은 기존 사용되던 2<sup>7</sup> 인자 실험설계법에 비해 필요한 실험수가 약 25%수준으로 효율적이다.

### 3.4 메타모델 개발 및 비교

메타모델에서 종속변수는 운용가용도이고 독립변수  $X_i$ 는 엔진과 각 모듈 재고수준이다.  $X_i$  앞의 숫자는 각 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 나타내는 효과계수이고 이 계수가 클수록 독립변수가 종속변수에 미치는 영향이 크다. 메타모델의 수식은 다음과 같다.

$$\text{운용가용도}(A_0) = \beta_0 + \beta_1 X_{\text{엔진}} + \beta_2 X_{\text{Fan}} + \beta_3 X_{\text{Core}} + \beta_4 X_{\text{FDT}} + \beta_5 X_{\text{Aug}} + \beta_6 X_{\text{Gearbox}}$$

메타모델을 개발하기 위해 두 실험설계법에 의한 시뮬레이션 실행 결과를 SPSS 19.0를 활용하여 다중회귀분석을 실시하였다. 회귀분석의 경우 NOLH 실험설계법의 경우 샘플수가 17개로 유의한 결과를 얻기에 제한되므로 두 실험설계법 모두 각 200번의 시뮬레이션 결과를 모두 이용하여 분석을 실시하였다. 다중회귀분석 결과에서 공통적으로 Gearbox의 회귀계수가 음(-)으로 나타났고 유의확률도 높게 나타나 Gearbox를 제외하고 다시 회귀분석을 실시하였다. 각 실험설계법에 따른 회귀분석 결과는 <표 7>과 같다.

두 실험설계법에 의한 메타모델 모두 다수 샘플로 회귀분석을 실시하여 각 독립변수의 유의확률과 메타모델 전체의 유의확률은 0에 가까운 결과를 보이기 때문에 두 메타모델 모두 유의하다고 할 수

있다. 시뮬레이션의 결과와 메타모델을 통해 산출된 결과를 비교함으로써 메타모델의 유효성을 검증할 수 있고, 2<sup>k</sup> 인자 기법과 NOLH 기법을 통해 도출된 두 메타모델의 유효성을 비교함으로써 본 시뮬레이션 모형에 적합한 메타모델을 판단할 수 있다. 두 메타모델의 유효성을 비교하기 위해서 엔

진과 각 모듈의 극단값 사이에서 난수를 발생시켜 얻은 임의의 시나리오 20개를 생성하였다. 각 시나리오별 시뮬레이션 값과 두 메타모델의 값을 비교한 오차 절대값평균(MAE : Mean Absolute Error), 오차 제곱평균(MSE : Mean Squared Error)과 신뢰구간 포함여부는 <표 8>과 같다.

<표 7> 시뮬레이션 결과에 대한 회귀분석결과

| 구 분                        |   | Y절편     | 엔진     | Fan    | Core   | FDT    | Aug    |
|----------------------------|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2 <sup>k</sup> 인자<br>실험설계법 | t 통계량   | 243.943 | 41.882 | 13.175 | 97.399 | 26.487 | 10.819 |
|                            | 유의확률  | 0.0000  | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
|                            | 샘플수(12800), 결정계수(0.4888), 표준오차(0.0402), 전체 유의확률(0.0000) |         |        |        |        |        |        |
| NOLH<br>실험설계법              | t 통계량   | 82.522  | 10.670 | 4.361  | 42.624 | 11.206 | 2.059  |
|                            | 유의확률  | 0.0000  | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
|                            | 샘플수(3400), 결정계수(0.3731), 표준오차(0.0382), 전체 유의확률(0.0000)  |         |        |        |        |        |        |

2<sup>k</sup> 인자 실험설계법 메타모델 :  $A_o = 0.68400 + 0.00744X_{엔진} + 0.00052X_{Fan} + 0.00385X_{Core} + 0.00111X_{FDT} + 0.00030X_{Aug}$   
 NOLH 실험설계법 메타모델 :  $A_o = 0.70247 + 0.00551X_{엔진} + 0.00051X_{Fan} + 0.00504X_{Core} + 0.00138X_{FDT} + 0.00017X_{Aug}$

<표 8> 메타모델의 유효성 비교

| 순번  | 구 분 |     |      |     |     |     |           | 시뮬레이션    |           |           | 2 <sup>k</sup> 실험설계법 |            |           | NOLH 실험설계법 |            |  |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----------|----------|-----------|-----------|----------------------|------------|-----------|------------|------------|--|
|     | 엔진  | Fan | Core | FDT | Aug | G/B | 운용<br>가용도 | 표준<br>편차 | 95%<br>CI | 운용<br>가용도 | 오차                   | 신뢰구간<br>포함 | 운용<br>가용도 | 오차         | 신뢰구간<br>포함 |  |
| 1   | 11  | 13  | 15   | 20  | 22  | 15  | 0.8788    | 0.0425   | 0.0059    | 0.8590    | 0.0198               | ×          | 0.8766    | 0.0022     | ○          |  |
| 2   | 13  | 17  | 30   | 18  | 21  | 14  | 0.9506    | 0.0322   | 0.0045    | 0.9311    | 0.0195               | ×          | 0.9623    | -0.0116    | ×          |  |
| 3   | 15  | 24  | 18   | 13  | 18  | 16  | 0.9194    | 0.0394   | 0.0055    | 0.8971    | 0.0223               | ×          | 0.9090    | 0.0103     | ×          |  |
| 4   | 14  | 18  | 22   | 13  | 30  | 11  | 0.9218    | 0.0353   | 0.0049    | 0.9054    | 0.0163               | ×          | 0.9226    | -0.0009    | ○          |  |
| 5   | 15  | 21  | 29   | 29  | 5   | 10  | 0.9674    | 0.0267   | 0.0037    | 0.9517    | 0.0157               | ×          | 0.9827    | -0.0153    | ×          |  |
| 6   | 13  | 19  | 14   | 30  | 27  | 12  | 0.8832    | 0.0478   | 0.0067    | 0.8857    | -0.0025              | ○          | 0.9003    | -0.0170    | ×          |  |
| 7   | 15  | 18  | 25   | 16  | 18  | 23  | 0.9538    | 0.0302   | 0.0042    | 0.9242    | 0.0296               | ×          | 0.9453    | 0.0085     | ×          |  |
| 8   | 12  | 13  | 18   | 28  | 25  | 26  | 0.9036    | 0.0435   | 0.0061    | 0.8877    | 0.0159               | ×          | 0.9087    | -0.0051    | ○          |  |
| 9   | 13  | 22  | 29   | 23  | 7   | 29  | 0.9624    | 0.0250   | 0.0035    | 0.9313    | 0.0312               | ×          | 0.9643    | -0.0018    | ○          |  |
| 10  | 14  | 24  | 22   | 15  | 8   | 20  | 0.9332    | 0.0290   | 0.0040    | 0.9043    | 0.0290               | ×          | 0.9247    | 0.0085     | ×          |  |
| 11  | 14  | 26  | 17   | 16  | 22  | 20  | 0.9062    | 0.0442   | 0.0062    | 0.8913    | 0.0149               | ×          | 0.9043    | 0.0019     | ○          |  |
| 12  | 11  | 15  | 29   | 21  | 20  | 24  | 0.9408    | 0.0322   | 0.0045    | 0.9144    | 0.0264               | ×          | 0.9491    | -0.0083    | ×          |  |
| 13  | 11  | 17  | 13   | 20  | 19  | 9   | 0.8607    | 0.0438   | 0.0061    | 0.8525    | 0.0082               | ×          | 0.8681    | -0.0073    | ×          |  |
| 14  | 15  | 19  | 22   | 15  | 5   | 14  | 0.9334    | 0.0348   | 0.0049    | 0.9082    | 0.0252               | ×          | 0.9272    | 0.0063     | ×          |  |
| 15  | 15  | 22  | 26   | 25  | 24  | 10  | 0.9751    | 0.0237   | 0.0033    | 0.9419    | 0.0332               | ×          | 0.9659    | 0.0092     | ×          |  |
| 16  | 11  | 26  | 15   | 22  | 22  | 15  | 0.8787    | 0.0487   | 0.0068    | 0.8680    | 0.0107               | ×          | 0.8860    | -0.0073    | ×          |  |
| 17  | 13  | 30  | 23   | 14  | 25  | 19  | 0.9262    | 0.0381   | 0.0053    | 0.9077    | 0.0185               | ×          | 0.9289    | -0.0026    | ○          |  |
| 18  | 13  | 14  | 30   | 13  | 11  | 26  | 0.9198    | 0.0355   | 0.0050    | 0.9211    | -0.0013              | ○          | 0.9521    | -0.0324    | ×          |  |
| 19  | 15  | 25  | 13   | 17  | 27  | 22  | 0.8927    | 0.0454   | 0.0063    | 0.8855    | 0.0072               | ×          | 0.8914    | 0.0013     | ○          |  |
| 20  | 14  | 28  | 24   | 14  | 18  | 21  | 0.9284    | 0.0374   | 0.0052    | 0.9159    | 0.0125               | ×          | 0.9372    | -0.0087    | ×          |  |
| MAD |     |     |      |     |     |     |           |          |           | 0.0180    |                      | 2개         | 0.0083    |            | 7개         |  |
| MSE |     |     |      |     |     |     |           |          |           | 0.0004    |                      |            | 0.0001    |            |            |  |

NOLH 실험설계법을 통해 도출된 메타모델은 2<sup>k</sup> 인자 기법에 의해 도출된 메타모델보다 오차 절대값평균은 약 50%, 오차 제곱평균은 약 25%수준으로 훨씬 적게 나타났다. 메타모델의 결과가 시뮬레이션 결과의 95% 신뢰구간에 포함되는 결과를 살펴볼 때 2<sup>k</sup> 실험설계법은 2개, NOLH는 7개로서 이는 NOLH에 의해 도출된 메타모델이 시뮬레이션 모형을 더 잘 반영하고 있음을 의미한다. 따라서 NOLH 실험설계법을 통해 도출된 메타모델이 본 연구의 시뮬레이션 모형에 더 효과적이다.

### 4. 적정재고수준 결정 모형

전시 목표 운용가용도 달성을 위한 적정재고수준 결정은 기존 연구와 비교하여 결정할 수 있다. 본 연구는 기존 연구들[3, 19]에서 최적화 모형으로 주로 사용된 선형계획모형과 Qizhi and Bin[13]이 활용한 ARENA OptQuest 최적화 프로그램을 이용하여 적정재고수준을 산출하고 이를 비교함으로써 적정재고수준을 결정하였다.

#### 4.1 선형계획모형

NOLH 실험계획법을 통해 도출된 메타모델이 본 연구에 적합한 모델임을 확인하였다. 유효성이 입증된 메타모델을 바탕으로 적정재고수준은 선형계획모형으로 결정할 수 있다. 본 연구의 주된 관심사는 전시 목표 운용가용도를 충족하기 위해 예비엔진 및 모듈을 현 재고수준에서 추가로 얼마나 더 확보해야 할 것인가를 결정하는 것이며, 이때 비용을 최소화하는 것이다. 적정재고수준을 결정하기 위한 선형계획모형은 다음과 같다.

<목적함수>

$$\text{MIN(비용)} = 4,716,233 \times X_{\text{엔진}} + 661,260 \times X_{\text{Fan}} + 2,920,452 \times X_{\text{Core}} + 464,808 \times X_{\text{FDT}} + 645,573 \times X_{\text{Aug}}$$

<제약조건>

1)  $0.70247 + 0.0055087 \times X_{\text{엔진}} + 0.0005132 \times X_{\text{Fan}} + 0.0050359$

$$\times X_{\text{Core}} + 0.0013778 \times X_{\text{FDT}} + 0.0001717 \times X_{\text{Aug}} \geq 0.95$$

(목표 운용가용도 : A<sub>0</sub>)

2)  $X_{\text{엔진}} \geq 11, X_{\text{Fan}} \geq 12, X_{\text{Core}} \geq 12, X_{\text{FDT}} \geq 13, X_{\text{Aug}} \geq 4$

3)  $X_{\text{엔진}} \leq 15, X_{\text{Fan}} \leq 30, X_{\text{Core}} \leq 30, X_{\text{FDT}} \leq 30, X_{\text{Aug}} \leq 30$

4)  $X_i = \text{정수}$

목적함수는 엔진 및 모듈의 단가와 재고량을 곱하고 이를 모두 합한 비용이 최소가 되는 재고수준을 찾도록 설정하였다. 첫 번째 제약조건은 예비엔진과 모듈의 재고수준이 목표 운용가용도 95% 이상을 달성해야 한다는 것을 나타낸다. 회귀분석을 통해 도출된 효과계수에 각 재고수준을 곱해주고 이를 모두 합하여 구한 운용가용도가 95% 이상이 되어야 한다. 두 번째 제약조건은 엔진과 모듈의 재고수준은 현 보유재고량 이상이어야 한다는 것이다. 초기 도입단계가 아닌 운영유지단계에서의 적정재고수준을 찾는 것이 목적이기 때문이다. 세 번째는 적정재고수준의 상한선을 나타낸 것이다. 재고수준이 엔진은 15개, 모듈은 30개 이상을 초과하지 않도록 하였다. 적정재고수준에 상한선을 두지 않으면 구매단가 대비 운용가용도에 미치는 효과계수가 가장 큰 FDT 모듈의 재고수준만 늘어날 것이다. 어느 한 모듈의 재고수준만 증가한다고 운용가용도가 계속 증가한다는 것은 비현실적이다. FDT 모듈의 정비소요에는 한계가 있고 여전히 다른 모듈에 의한 정비소요가 많이 발생하기 때문이다. 마지막 제약조건은 재고의 수는 정수로 표현해야 한다는 것을 나타낸다.

#### 4.2 ARENA OptQuest

적정재고수준을 찾는 것은 최적화 문제로 ARENA의 OptQuest를 활용하여 목표가용도를 충족하고 비용을 최소화하는 적정재고수준을 찾을 수 있다. OptQuest는 타부 탐색법(Tabu Search) 및 산발 탐색법(Scatter Search)을 사용하여 입력 통제 공간에서 지능적으로 탐색을 해 가며, 최적해에 신속하고 신뢰성 있게 수렴하려고 시도한다[9]. 타부 탐색은 최적화 기법의 하나로 인간의 기억구조를

〈표 9〉 적정재고수준 산출 비교

| 구 분      | 엔진        | Fan       | Core      | FDT       | Aug      | G/B      | 운용 가용도        | 총비용(\$)            | 추가비용(\$)          |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|---------------|--------------------|-------------------|
| 현 재고     | 11        | 12        | 12        | 13        | 4        | 9        | 0.8486        | 104,540,521        | -                 |
| 선형계획     | <b>11</b> | <b>12</b> | <b>28</b> | <b>29</b> | <b>4</b> | <b>9</b> | <b>0.9509</b> | <b>158,704,681</b> | <b>54,164,160</b> |
| OptQuest | 15        | 16        | 22        | 22        | 7        | 24       | 0.9521        | 163,136,000        | 58,595,479        |

이용하여 복잡한 해 영역에서 최적해를 얻기 위해 탐색을 유도하는 메타 휴리스틱이다. 산발 탐색은 탐색 과정에서 축적된 과거 역사를 감안하여 보다 체계적으로 해를 생성하는 기법이다[8].

OptQuest도 선형계획모형과 동일하게 제약조건과 목적함수를 설정해준다. 최적 조합을 찾아야 할 엔진과 모듈은 통제변수로서 그 값은 정수를 선택하게 설정하고, 제약조건은 엔진과 모듈의 재고와 현 재고수준 이상, 운용가용도 95% 이상을 만족하도록 설정한다. 마지막으로 목적함수는 총 재고 비용으로서 최소화를 선택한다. OptQuest 결과, 시뮬레이션은 총 924번을 수행하였고 최소비용이 산출된 것은 473번째였으며, 적정재고수준은 엔진 15개, Fan 16개, Core 22개, FDT 22개, Aug 7개, Gearbox 24개로 나타났다.

#### 4.3 적정재고수준 결정

전시 목표 운용가용도 충족과 동시에 비용을 최소화하는 적정재고수준을 결정하기 위해서 선형계획모형의 결과와 ARENA OptQuest 결과를 비교하였다. 선형계획모형에 의한 최적해 결과와 그에 따른 메타모델의 운용가용도, 총 소요비용의 결과는 <표 9>와 같다.

선형계획모형을 통해 산출된 적정재고수준은 Core가 28개, FDT가 29개이고 나머지 모듈과 엔진은 현 재고와 차이가 없다. 현 재고에서 Core와 FDT가 각각 16개씩 증가하고 이를 위해 필요한 추가비용은 약 \$ 5,410만으로 나타났다. OptQuest를 이용하여 산출된 적정재고수준은 엔진 15개, Fan 16개, Core 22개, FDT 22개, Aug 7개, Gearbox 24개이고 추가비용은 약 \$ 5,860만으로 나타났다. 선형계획모형에

의해 산출된 재고수준이 OptQuest 결과보다 약 \$ 443만의 비용을 절약할 수 있는 것으로 나타나 더 적절하다고 판단된다.

선형계획모형에 의해 산출된 적정재고수준은 특정한 몇몇 모듈만 증가시키는데 이는 선형계획모형 적용시 주의할 점이다. 목적함수가 비용최소화인 선형계획모형에서는 재고단가 대비 효과계수가 큰 것부터 재고를 증가시키기 때문이다. 또한 OptQuest를 통한 최적화도 완벽하지 않으며, 모든 경우에 정확히 최적해를 찾는 것을 보장할 수 없다[9]. 정확한 결과를 위해서는 가능한 모든 경우의 수를 시뮬레이션 해야 하지만 그것은 현실적으로 불가능하다. 선형계획모형과 OptQuest를 상호 비교하여 의사결정을 하는 것이 바람직하다.

## 5. 결 론

본 연구는 예비엔진 및 모듈 재고수준이 전시 항공기 운용가용도에 미치는 영향을 살펴보고 목표 운용가용도를 유지하기 위한 적정재고수준을 결정하고자 하였다. 이를 위해 전시 항공기 운용가용도에 영향을 미치는 전시 정비소요를 분석하여 시뮬레이션 모형에 반영하였다. 적정재고수준을 산출하기 위한 메타모델 개발시 2<sup>k</sup> 인자 실험설계법과 NOLH 기법을 비교하였다. 또한 메타모델을 기반으로 한 선형계획모형을 통해 예비엔진과 모듈의 적정재고수준을 산출하고, 이를 ARENA OptQuest 최적화 결과와 비교하여 전시 목표 운용가용도를 고려한 적정재고수준을 제시하였다.

본 연구는 시뮬레이션 모형과 분석적 모형이 갖는 장점을 채택, 빠른 시간에 적정재고수준을 산출할 수 있는 메타모델을 제시하였다. 연구의 학술적

의의는 첫째, NOLH 실험설계법 적용으로 효율적이고 정확한 메타모델을 개발하였다. 기존의 실험설계법으로 사용된 2<sup>k</sup> 인자 설계법은 각 요인수에 2의 승수만큼 시나리오를 생성하여 상대적으로 많은 시뮬레이션이 필요하나 NOLH는 직교성에 의한 샘플 추출로 상대적으로 적은 시나리오를 필요로 하여 데이터 산출에 적은 시간이 소요된다. 또한, 2<sup>k</sup> 인자 설계법은 각 요인들의 최대값과 최소값만을 고려하여, 각 요인의 영역내부에 있는 값을 고려하지 못해 메타모델의 결과가 오차가 상대적으로 크게 나타났다. 하지만 NOLH를 적용한 시나리오 선정은 각 요인의 전 영역에 걸쳐 고르게 샘플을 추출하여 메타모델의 정확성을 높일 수 있었다. 둘째, 시뮬레이션의 최적화 프로그램 결과와 메타모델에 선형계획법을 활용하여 도출한 적정재고수준을 비교하여 결과의 유효성을 입증하였다. 제약조건으로 일정 운용가용도를 만족하도록 설정 후 적정재고수준을 도출한 결과 본 연구 모형이 시뮬레이션 최적화 방법에 비해 비용을 상당히 절약할 수 있다는 것을 보여주었다.

본 연구의 실무적 의의는 현재 군이 전시를 대비하여 예비엔진과 모듈을 확보하는 가이드라인을 제시할 수 있다. 첫째, 현재 예비엔진과 모듈의 재고수준은 평시 운영을 만족하는 양으로서 정비소요가 급증하는 전시 운용가용도는 급격히 저하된다. 따라서 전시에 목표 운용가용도를 만족하기 위해서 구체적으로 어떤 수리부속을 얼마만큼을 확보해야 하는가를 본 연구는 제시할 수 있다. 둘째, 엔진과 모듈이 운용가용도에 미치는 영향을 보여주는 메타모델을 제시하여 중점적으로 관리해야 할 품목이 무엇인지를 제시하였다. 연구에서 제시한 메타모델의 효과계수는 각 수리부속이 운용가용도에 미치는 영향력을 나타내는 것으로, 목표 운용가용도를 만족하기 위해 Core와 FDT를 중점적으로 관리해야 함을 의미한다.

하지만 본 연구는 다음과 같은 한계점을 가지고 있다. 첫째, 항공기 엔진과 모듈의 적정 재고수준을 결정하는 메타모델의 각 독립변수들은 선형모형을

가정하여 각 변수 간 교호작용은 고려하지 않았다. 항공기 부품의 경우 신뢰도가 매우 높은 부품을 사용하기 때문에 각 부품의 고장은 독립적으로 발생한다고 가정하고 연구를 진행하였으나, 기계류 고장의 상호작용에 의한 고장은 현실상 완전히 배제할 수 없기 때문에 차후 연구에서 이러한 사항을 보완한다면 보다 정확한 모형을 만들 수 있을 것이다. 둘째, 전시 항공기 운용가용도에 영향을 미치는 다양한 불확실성을 반영하지 못했다. 전시의 경우 수많은 불확실성이 있어 많은 가정사항을 바탕으로 하기 때문에 이러한 사항을 다수 반영하기에는 제한이 되어 본 연구는 증가하는 비행소티를 만족하기 위해서 현 재고에서 어느 품목을 얼마나 더 구매해야 하는가에 중점을 두고 연구를 진행하였다. 따라서 차후 연구에서는 전시 발생가능한 다양한 상황(예 : 창 및 기지 긴급수리대 체제)과 실제 훈련데이터를 모형에 반영한다면 좀 더 전시에 가까운 모형을 형성할 수 있으리라 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 공군본부, 「전시 항공기 수리부속 소요산정 연구」, 공군본부, 2006.
- [2] 공군본부, 「항공기 기관관리(공군교범 4-3-2)」, 공군본부, 2011.
- [3] 이상진, 배주근, 김민규, “항공기 예비엔진 및 모듈 재고수준이 운용가용도에 미치는 영향”, 『품질경영학회지』, 제38권, 제3호(2010), pp.334-335.
- [4] 이 영, 문성암, 석순복, “복원적 공급사슬 디자인 : 육군공급사슬 사례연구를 중심으로”, 『한국SCM학회지』, 제13권, 제1호(2013), pp.94-95.
- [5] 이춘섭, 우제웅, 「항공기 예비기관/모듈 적정소요 산출공식 정립」, 한국국방연구원, 1999.
- [6] 정일한, 윤원영, “가용도 제약하에 MIMC 시스템에서 유전알고리즘과 시뮬레이션을 이용한 수리부속 최적화”, 『품질경영학회지』, 제36권, 제2호(2008), pp.9-19.

- [7] Cioppa, T.M., *Efficient Nearly Orthogonal and Space-Filling Experimental Designs for High-Dimensional Complex Models*, Naval Postgraduate School, Monterey, 2002.
- [8] Glove, F., M. Laguna, and M. Mari, "Fundamentals of Scatter Search and Path Re-linking," *Control and Cybernetics*, Vol.39, No. 3(2000), pp.653-654.
- [9] Kelton, W.D., P.S. Randall, and T.S. David, *Simulation with Arena*, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, 2007.
- [10] Köchel, P. and U. Nieländer, "Simulation-based optimisation of multi-echelon inventory systems," *International Journal of Production Economics*, Vol.93(2005), pp.505-513.
- [11] O'Malley, T., "The Aircraft Availability Model : Conceptual Framework and Mathematics," *Technical Report AF201*, Logistics Management Institute, Washington, D.C., 1983.
- [12] Pratt and Whitney Co., *IPE Engine Model Specification*, P&W CP11350A, SCN No. 21, 1995.
- [13] Qizhi, H. and H. Bin, "Simulation Model of Multi-Echelon Closed Supply Chain for Spare Parts," *Intelligent Systems and Applications, 3rd International Workshop on. IEEE*, 2011.
- [14] Sanchez, S.M., "Better than a Petaflop : The Power of Efficient Experimental Design," CA : Naval Postgraduate School, *Winter Simulation Conference*(2008), p.78.
- [15] Sherbrooke, C.C., *Optimal Inventory Modeling of Systems*, Massachusetts : Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [16] Slay, F.M., "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., 1980.
- [17] Slay, F.M. et al., "Optimizing Spares Support : The Aircraft Sustainability Model," *Technical Report AF501MR*, Logistics Management Institute, Washington, D.C., 1996.
- [18] Slay, F.M., C.C. Sherbrooke, and D.K. Peterson, "Predicting Wartime Demand for Aircraft Spares," *Air Force Journal of Logistics*, Vol.XX, No.2(1996), pp.16-22.
- [19] Steans III, D.E., *Logistics Simulations Meta model For F404-GE-400 Engine Maintenance*, Monterey : Naval Postgraduate School, 1998.
- [20] Tao, N. and S. Wen, "Simulation of a closed loop multi-echelon repairable inventory system," *Management Science and Engineering, International Conference on. IEEE*, 2009.