

# 항공기 유형을 고려한 최적 예비엔진 및 모듈 소요 산출

전태보<sup>†</sup> · 손영환 · 김기동

## Optimal Number of Spare Engines and Modules for Aircraft Types

Tae Bo Jeon<sup>†</sup> · Young Hwan Sohn · Ki Dong Kim

### ABSTRACT

Spare engine plays an important role for securing readiness of military strength during unexpected fault occurrences and field/depot planned maintenances. The purpose of this research is to present an approach towards the optimal number of spare engines/modules for diversity of aircraft types. We first reviewed two representative approaches, METRIC and meta model. We then investigated military aircrafts and categorized them into 5 types with regard to the engine type and number of engines/modules per aircraft. Through rigorous investigation of planned/non-planned maintenance of each type, we drew parameters and variables involved. As known, due to the complexity of the problem, it is impossible to develop a simple mathematical model with a closed form solution. Based on the airbase operation and maintenance logic with parameters/variable drawn, we developed a simulation model using ARENA well representing real field exercises. For the optimal solution, we applied OptQuest. It has shown that the program developed generates reliable results through a set of case examples.

**Key words** : Spare Engine, METRIC, Meta Model, ARENA, OptQuest

### 요약

기지/창 계획정비와 불시 결합발생에 따른 항공기 불가동 최소화를 위해 장착엔진에 추가로 보유하는 엔진이 예비엔진으로 항공기의 적정 가용도 달성을 통한 군사력 유지에 핵심적인 중요성을 지닌다. 본 연구의 목적은 다양한 군용항공기의 유형을 고려한 예비엔진/모듈의 최적 소요를 산출하는 방법을 제시하는 것이다. 먼저, 이 분야의 대표적 접근법인 METRIC과 메타모형에 대하여 각각의 개념, 특징 및 제한사항을 고찰하고 본 연구에서의 접근 방향을 제시하였다. 다음으로, 다양한 군용항공기에 대한 검토를 수행하고 이들을 총 5가지 유형으로 분류하였다. 유형별 계획, 비계획 정비에 대한 상세 분석을 기반으로 관련된 변수와 파라미터들을 도출하였다. 본 문제의 복잡성으로 인해 수식을 이용한 최적해의 도출이 불가능하며, 기지/야전/창 등의 정비로직을 분석한 후 ARENA 기반의 시물레이션과 OptQuest를 이용하여 최적소요를 산출하였다. 개발된 시물레이션 모델이 일련의 사례들을 통하여 최적해를 효율적으로 도출할 수 있음을 보였다.

**주요어** : 예비엔진, METRIC, 메타모델, ARENA, OptQuest

## 1. 서론

기지(base)/창(depota) 계획정비와 불시 결합발생에 따른

\* 본 논문은 공군본부 지원 및 2015도 강원대학교 학술연구 조성비로 연구하였음(관리번호 520150064)

**Received:** 08 November 2016, **Revised:** 27 July 2017,  
**Accepted:** 07 August 2017

**† Corresponding Author:** Tae Bo Jeon  
E-mail: tbjeon@kangwon.ac.kr  
Kangwon National University System &  
Management Engineering

항공기 불가동 최소화 및 소요 충족을 위해 항공기 장착엔진 이외에 추가로 보유 엔진이 예비엔진(Spare Engine)으로 전력사업 시 항공기 획득과 별도로 확보하고 있다. 공군은 자체의 예비엔진 확보기준을 설정하여 운영하고 있으나, 산출근거 부족/신뢰성 미흡으로 전력사업시 적정 수량을 반영함에는 제한적이다. 현 공군의 예비엔진 확보는 항공기의 수, 항공기 당 장착엔진 수, 정비 도달기간, 정비중간계수, 비행시간 등을 고려한 산출 식을 적용하여 소요를 산출하나 현실적으로는 제작사의 추천 수량에 따라 사업예산 범위 내 확보하고 있는 실정이다.

본 연구의 주된 목적은 군용항공기의 다양한 유형을 검토, 분류하고 유형에 따라 최적 예비엔진 수량 산출을 위한 효율적인 방법을 제시함에 있다. 연구 수행을 위하여 제 2절에서는 예비엔진 수량 산출과 관련한 대표적 모형인 METRIC(Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control) 모형과 메타모형에 대한 개념 및 특징 등을 고찰한다. 본 연구에서 다루는 문제는 내용의 복잡성으로 closed form의 해를 구하는 것이 불가능하다. 이런 이유로 최적화의 기법을 병합한 시뮬레이션 접근 방법을 적용하였다. 제 3절에서는 고려되는 항공기 기종들 전반에 대하여 검토하고 이들을 본 연구에서 개발할 모형을 위해 재분류한다. 분류된 유형별로 정비 특성들을 검토한 후 수반되는 주요 파라미터들과 변수들을 식별·정의하고 시뮬레이션 모델을 작성한다. 제 4절에서는 작성된 모델을 중심으로 최적 예비엔진/모듈의 수량산출 방법을 논한다. 제 5절에서는 이상의 내용 전반에 대한 결론을 내리며 향후의 연구로서 확장되어야 할 주제들을 제시한다.

## 2. 예비엔진/모듈 수량산출 방법론

적정 예비엔진 수량 결정과 관련한 연구들은 대표적으로 METRIC 모형과 메타모형 기반의 수리계획 모형 접근법으로 대별된다.

### 2.1 METRIC 모형

METRIC은 부대(base)와 창(depot) 등 2단계 또는 그 이상의 다단계(multi-echelon) 정비보급체계에서 각 노드의 수리부품에 대한 평균재고부족량(EBO, Expected Back Orders)의 합을 최소화하는 적정재고수준을 결정하기 위해 Sherbrooke(1968)에 의해 처음 수립된 모형을 기반으로 발전하였다. 즉, 수리/보급 지원을 위해 부대 및 창 각 단계에서 특정 예비 수량을 재고로 유지할 경우 예상되는 단계별 기대부족량의 총 합을 최소화하기 위한 근사적 모형이다. 이에 추가로 다단계 부품 구조(indenture)를 갖는 경우는 더 복잡하다. LRU(Line Replaceable Unit) 및 SRU(Shop Replaceable Unit)에 의한 체계 고장이 가능하며, 이들의 수리교체와 적정재고를 고려하기 때문이다. METRIC 모형에서 최적해는 한계분석법(marginal analysis)을 이용하여 최적치를 산출한다.

METRIC을 기반으로 여러 형태의 모형들이 제시되었으며 Table 1에 연구들의 개략적인 분류와 대표적인 연구들을 요약한다. 이상의 기본 모형 외에 여러 연구자들이 유한정비능력, 부대간의 전환보급(lateral supply/ lateral

transshipment) 동류전용(cannibalization), 계획정비(planned maintenance) 등 보다 현실적인 다양한 상황을 고려한 연구를 수행하였다(Lee(1987), Sherbrooke (1992), 우제웅(2000), 윤혁&이상진(2008) 등).

### 2.2 메타모형 기반의 수리계획적 접근

본 연구와 관련한 또 다른 접근법은 메타모형 기반의 수리계획법의 적용이다. 메타모형은 다단계 수리시스템에서 최소의 비용을 가져오는 최적 예비/수리부품수의 결정 과정에서 가용도를 최대화하기 위한 기법으로 Madu 등(1992)에 의해 제시되었다.

본 문제를 선형정수계획 모형으로 수립할 경우 목적함수 및 제약조건은 다음과 같이 설정 가능하다.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + C_4X_4 + C_5X_5 + C_6X_6 \\ \text{s.t. } & a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_6X_6 \geq b_0 \\ & L_i \leq X_i \leq U_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \end{aligned}$$

(단,  $X_i$ 는 정수)

첫 번째 식은 목적함수로 계수( $C_i, i=1,2,\dots,6$ )들은 엔진 및 모듈별 구입비용을 의미하며 총 구입비용을 최소화하는 예비 엔진과 5가지 모듈들의 수량,  $X_i (i=1,2,\dots,6)$ 을 구하고자 함이다. 두 번째 식은 제약으로 엔진 및 모듈 각각의 예비수량을 통하여 최소한의 운용가용도( $b_0$ )가 달성되어야 함을 의미한다. 마지막으로,  $L_i$ 와  $U_i$ 는 엔진 및 모듈들 수량에 대한 고려 영역이다. 이 모형에서  $C_i, L_i, U_i$ 는 주어지므로 계수  $a_i (i=1,2,\dots,6)$  값들이 정해지면 메타모형이라 불리는 제약식의 결정과 함께 모형이 완전히 정해지게 된다. 최적해는 설정된 모형에 LINGO 등 소프트웨어를 활용하여 구할 수 있다. Table 2에 이 접근과 관련한 주요 연구들 내용을 요약한다.

예비엔진 등의 수량 산출과 관련한 제 3의 접근은 고장과 수리 등을 상태 및 전이(transition)를 이용한 확률과정(stochastic process)으로 분석하는 것이나, 모형수립의 복잡성으로 인해 본 연구에서는 권장되지 않는다.

상술한 두 접근법은 검증된 방법론으로서 높은 활용도를 보이고 있으나 본 연구의 목적을 고려하면 한계점을 갖고 있다. 첫째, METRIC 모형의 경우 목적함수가 노드들의 평균재고부족량 총 합을 최소화 하는 함수로서 자체가 근사값이며 이를 만족하는 해는 1회의 수식 평가가 아닌 반복적인 과정을 통하여 산출된다. 더욱이, 본 문제의 경우 다양한 확률변수가 포함되며 일반화하기 위해서는 여러 확률변수 함수를 모두 포함하여 모델링해야 한

**Table 1.** Previous studies of METRIC approach

Model	Researcher	Contents/Characteristic
METRIC	Sherbrooke(1968)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• single-indenture</li> <li>• composite Poisson demand</li> <li>• infinite maintenance capability</li> <li>• underestimate the expected shortages</li> <li>• base &amp; depot maintenance and supply systems</li> <li>• Poisson resupply rate</li> <li>• approximate model</li> </ul>
	Simon(1971) Kruse(1979)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poisson assumption</li> <li>• not very useful due to computational complexity and time</li> <li>• more accurate evaluation of expected shortages</li> </ul>
Mod-METRIC	Mudstadt(1973)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• consider hierarchical indenture structure (LRU, SRU)</li> <li>• composite Poisson demand</li> <li>• infinite maintenance capability</li> <li>• Poisson resupply rate</li> </ul>
Vari-METRIC	Slay(1980) O'Malley(1983)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poisson demand</li> <li>• infinite maintenance capability</li> <li>• apply to AAM(Aircraft Availability Model) inventory model of US airforce</li> <li>• negative binomial for resupply inventory</li> </ul>
	Graves (1985)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• approximate model for Vari-METRIC</li> <li>• composite Poisson demand</li> </ul>
	Sherbrooke(1986)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• consider multi-indenture with Vari-METRIC</li> <li>• proved that Vari-METRIC gives more realistic backorder inventory</li> <li>• compare MOD-METRIC with Vari-METRIC via examples</li> </ul>
	OASIS (Optimal Allocation of Spares Initial Support)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vari-METRIC based model developed by Korean military</li> <li>• being used as the standard model for CSP demand determination</li> </ul>
Dyna-METRIC	Hillestad(1982)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• spare inventory model during wartime</li> <li>• apply to ASM(Aircraft Sustainability Model)</li> <li>• does not consider preventive maintenance on the availability evaluation</li> <li>• does not consider waiting time for repair</li> </ul>
	Hillestad, Carrillo (1980)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• simulation model with wartime cannibalization, lateral transshipment, and finite repair capability</li> </ul>

**Table 2.** Optimization approaches using meta model

Researcher	대 상	Contents
Steans III (1998)	F404-GE-400 Engine Module	<ul style="list-style-type: none"> <li>• optimal number of spare engine modules minimizing cost</li> <li>• multiple regression meta model via simulation</li> </ul>
Lee (2001)	Information Collection Aircraft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• optimal inventory of electronic system LRU, SRU for intelligence aircraft</li> <li>• integer linear programming with simulation and meta models</li> </ul>
Yoo (2003)	F-16 F100-PW-220 Engine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• F100-PW-220 engine/modules</li> <li>• multiple regression meta model using simulation</li> <li>• optimal solution through linear programming and branch &amp; bound Darkin Method</li> </ul>
Lee et al. (2010)	F-16 F100-PW-220/229 Engine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• F-16 F100-PW-220 &amp; 229 engines</li> <li>• mathematical model of maxmin</li> <li>• meta model with ARENA simulation</li> <li>• availability and budget constraints</li> </ul>
Logistic Command (2011)	F-16 F100-PW-220 Engine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• optimal number of spare engines &amp; modules satisfying operation rate using ARENA simulation and meta model for base, field, depot maintenances</li> </ul>
Kim et al. (2014)	F-16 F100-PW-220 Engine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• effects of spare engines &amp; modules on the wartime operational availability using ARENA simulation</li> <li>• apply meta model and statistical experimental method (2<sup>6</sup> and NOLH (Nearly Orthogonal Latin Hypercube))</li> <li>• optimal solution using ARENA OptQuest</li> </ul>

다. 둘째, 메타모형의 경우 문제의 핵심은 제약조건(메타모형)의 결정인데 이를 위해서는 다양한 확률변수, 모수값, 파라미터값 등에 대한 특정 조합(들)을 중심으로 실험계획을 수립하고 각각에 대한 시뮬레이션 결과를 수집

한 뒤 최종적으로 회귀분석을 통하여 제약인 가용도 수식을 도출한다. 문제는 고려할 수 있는 입력변수/파라미터 조합이 바뀔 경우 모든 과정을 다시 반복해야 한다는 점이다. 다양한 입력 값들의 변화에 따라 즉시적으로 해

를 검토하고자 함이 현업에서의 바램이다. 셋째, 본 문제에서는 단일 항공기가 아닌 모든 공군 항공기 유형을 고려하는 관계로 상기 두 방법의 적용은 매우 제한적이다.

### 2.3 본 연구에서의 접근법

본 연구의 문제는 Figure 1과 같이 부대, 야전, 그리고 창의 3단계로 구성된다. 엔진 및 모듈의 재고는 야전에서 보유하며 부대와 창은 재고를 갖지 않는다. 엔진과 모듈은 LRU, SRU와 같은 계층구조를 가진다. 예를 들어, F-16 항공기의 엔진은 LRU, 5가지 모듈들은 SRU에 해당된다. 그림의 우측은 실제 정비수요가 발생하는 입력부이며 편의상  $\lambda_i$  및  $R_i$ 는 엔진 및 5가지 모듈들의 고장률과 수리시간을 의미한다.

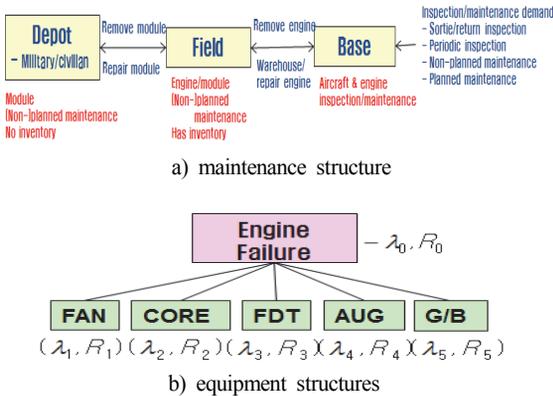


Fig. 1. Maintenance and equipment structures

다양한 항공기 유형을 고려한 적정 예비엔진 산출을 위해서는 수많은 파라미터와 통계적 변수들이 수반된다. 이렇게 항공기 유형 및 다양한 변수/파라미터들을 METRIC이나 메타모델을 이용한 통합 모형을 수립하는 것은 불가능하거나 필요시 모형의 단순화에 따른 부정확을 감수해야 한다. 이러한 측면에서 좋은 대안은 시물레이션을 통한 접근이다. 문제는 다양한 항공기들 유형들과 수없이 많은 엔진 및 모듈들의 조합들, 수반된 변수 및 파라미터들을 고려하며 최적해를 효과적으로 찾아가는 방법론의 정립이다. 즉, 모든 조합이 아닌 극히 일부 조합만을 검토하는 효과적인 방법으로 ARENA와 연동하여 구현할 수 있는 소프트웨어 패키지로 개발된 OptQuest의 활용이 매우 좋은 대안이다(OptQuest (2011), Laguna (2011)). OptQuest는 복잡한 시스템의 일반 최적화 문제의 해를 구해주는 상업용 소프트웨어로 다양한 최적화의 해법으로 널리 활용된다. 최적 탐색기법으로서 OptQuest

는 메타휴리스틱, 수리적 최적화, 그리고 신경망 기법 등을 이용한다.

## 3. 항공기 유형, 변수 및 로직 프로그램

### 3.1 항공기 유형과 특성

군용항공기는 전투기, 공중기동기, 감시통제기, 훈련기, 무인기, 헬리콥터 등으로 분류된다(양욱(2014)). 본 연구의 주된 관점이 예비 엔진/모듈의 적정재고와 정비절차이며 크게, 완제형 엔진과 모듈형 엔진 그리고 단발형 엔진과 쌍발형 엔진 등의 유형으로 분류가 가능하다. 그러나, 본 연구에서는 기종의 특성 및 향후의 확장성을 고려하여 항공기 유형을 다음과 같이 5가지로 분류한다.

Table 3. Aircraft type classification

No.	Aircraft/Engine Type
1	Fixed Complete (single or twin)
2	Fixed Modular (single or twin)
3	Fixed Multi-modular
4	Rotary Wing Twin Complete
5	Rotary Wing Twin Modular

이 분류 중 유형 3은 4대의 엔진을 갖는 수송기 등이 포함되며, 유형 4, 5는 유형 1, 2와 비슷하나 기종의 특성들을 고려하여 서로 다른 유형으로 분류하였다. 다만, F-15K의 경우 하나의 엔진을 갖는 고정익이나 엔진 당 여러 개의 모듈과 매우 많은 SRU를 가지며, 무인기는 정비 절차가 일반 항공기들의 부대, 야전, 창 등의 정비체계와 크게 다를 수 있다. 이러한 이유로 F-15K와 무인기는 고려에서 제외한다.

Table 4는 본 연구에서 정의한 항공기 유형별 정비 특성을 요약한 것이다. 표에서 보듯이 엔진 및 모듈의 정기적인 정비가 다양하며 순수 엔진 동작시간 또는 항공기 출동 횟수인 사이클 (또는 소티) 등으로 정의됨을 볼 수 있다.

### 3.2 프로그램 작성을 위한 변수 및 파라미터 설정

Table 4의 유형별 특성은 적정 예비 엔진/모듈 수준을 위한 알고리즘 개발에 있어 변수 및 파라미터 도출에 중요한 기반을 제공한다. 본 연구에서는 엔진고장과 관련한 문제에 초점을 가지므로 항공기 자체의 고장인 비엔진 문제는 고려하지 않는다. 이제 항공기 유형별 정비체계를 근간으로 항공기 운영을 통한 가용도 산출을 위한 다양한 변수 및 파라미터들을 설정·정의하였다. Table 5~

**Table 4.** Maintenance characteristics for each aircraft type

type	Fixed			Rotary wing	
	1	2	3	4	5
# engines	1, 2	1, 2	4	2	2
# modules	-	5	3	-	4
base	engine removal/ installation aircraft test run	engine removal/ installation aircraft test run	engine removal/ installation aircraft test run	engine removal/ installation aircraft test run	
field	engine repair engine test run	module removal/ installation module repair engine test run	module removal/ installation	engine repair engine test run	
depot	engine repair	module (non-) planned maintenance (except for AUG)	module repair	engine repair	
aircraft inspection period	ooo hrs	oo/ooo/**/xxx hrs	none	ooo/**/ etc.	ooo hrs
engine inspection period	F4-ooo sorties F5-oooo hrs	-	MOT-based depot maintenance	oooo hrs/ oo yrs	-
module inspection period	-	oooo TAC	turbine (depot maintenance) - 00000 cycle	-	oooo hrs

Table 7에 실제 전투비행단 운영상의 주요변수 및 파라미터들을 도식한다. 참고로, Table 6의 MC\_F는 야전의 정비능력으로 동시에 수리를 수행할 수 있는 작업자 또는 작업조의 수로 정의된다.

**Table 5.** Decision variables

Variable	Content
X <sub>0</sub>	number of spare engines (integer)
X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>5</sub>	number of spare modules (integer) (i=1,2,3,4,5)

**Table 6.** Input parameters (variables)

Variable/ Parameter	Content
A_type	aircraft type (1,2,3,4,5)
Sortie	sorties per day
A_max	total number of aircrafts
MC_F	field maintenance capability
Ntrig	Assembly modules when the inventory level of the engine is below this value. (applied only for modular type engines)
NEG	number of engines per aircraft (1,2,4)
NMO	number of modules per engine (0,1,2,3,4,5)
TET_max TEC_max	planned maintenance period for engine (hours and cycle)
TMT_max	planned maintenance period for module (hours) (i=1,2,3,4,5)

**Table 7.** Parameters and random variables

Variable/ Parameter	Content
Flytime	flight hours per sortie
MTBF	engine MTBF
p1	removal rate(%) of the failed engine
TOFFE	time to remove engine
TONE	time to install engine
p2	field - failed module removal rate(%)
TEF	field - engine repair time (module non-removal) - include length of repair, engine test run, store, wait, transport
TOFFM	module removal time - same for all modules
TONM	module installation time - same for all modules
TNO(i)	non-planned maintenance time of module I (i=1,2,3,4,5)
Q1/Q2/Q3/ Q4/Q5	proportion that an engine failure is incurred from a module
R1/R2/R3/ R4/R5	field repair rate of a module
TTFD	transportation time between field and depot (same for all engine and modules) * include warehouse in/out waiting times
TNT	(depot) non-planned engine maintenance time
TST	(depot) planned engine maintenance time
TND (i)	non-planned depot maintenance time of module i (i=1,2,3,4,5)
TSD (i)	planned depot maintenance time of module i (i=1,2,3,4,5)

### 3.3 프로그램 작성

이제 실제로 항공기 운용 및 엔진/모듈 정비를 위한 프로그램에 대하여 설명한다.

#### 3.3.1 프로그램을 위한 가정

프로그램 작성을 위한 전체 가정은 다음과 같다.

- 항공기 유형에 있어 단발은 1대, 쌍발은 2대, 그리고 다발은 4대의 엔진을 가정한다.
- 모듈형의 경우 최대 5개 모듈까지 고려 가능하다. 이를 초과하는 경우는 일부들이 통합적으로 고려됨을 가정한다.
- 항공기 비가동, 엔진 및 모듈의 저장 중에는 고장이 발생하지 않는다.
- 정비자원의 고장은 발생하지 않는다. 즉, 부대, 야전, 창고의 정비를 위한 설비/작업소는 전혀 고장나지 않으며 필요시 항상 가용하다. 다만, 야전 설비의 유한 능력으로 인한 대기는 발생 가능하다.
- 부대, 야전, 창고 정비를 통한 모듈 및 엔진의 정비는 완벽하며 정비결과 불량은 없다.
- 엔진/모듈상의 문제 발생시 수리능력에는 문제가 없으나 종종 부품 획득/보급상의 문제로 매우 긴 수리 시간을 요하는 경우가 발생한다. 특히, 외국 등 엔진/모듈 제작사나 해외 업체들로부터 조달 받는 경우가 이에 해당한다.
- 엔진의 고장은 엔진자체 및 모듈에 의한 고장에서 기인하되 모듈에 의한 엔진 고장시 단 하나의 모듈에 기인한다.
- 모든 계획 및 비계획 정비에 있어 2개 이상의 엔진 또는 모듈 등의 정비수요가 동시에 발생하지 않는다.

#### 3.3.2 정비 로직의 정의

항공기 유형이 여럿인 관계로 이들을 모두 설명하는 것은 어렵다. 이들중 고정익 모듈형은 본 연구에서 다루는 핵심적인 유형으로 세부적인 정비로직을 고찰할 필요가 있다. 이를 통하여 쌍발, 다발 유형에 대해서도 동일한 방법으로 로직이 정의될 수 있다. Figure 2~Figure 4에 고정익 모듈형 항공기/엔진/모듈에 대한 상세한 정비로직을 도시한다.

Figure 2는 부대정비 로직으로 항공기의 임무수행 중 정비수요 발생시 항공기는 불가동 상태가 되며 계획정비 경우와 엔진고장에 의한 비 계획정비의 경우 엔진을 장탈하여 야전으로 송부한다. 엔진 장탈과 병행하여 창고에 보유중인 예비엔진이 있을 경우 신청하며 창고로부터 엔

진을 불출받아 수리 대기중인 항공기에 장착하여 항공기를 가동상태로 환원시킨다. 엔진 장탈시 창고에 보유중인 예비엔진이 없을 경우 가용할 때까지 항공기는 계속 불가동 상태에 있게 된다.

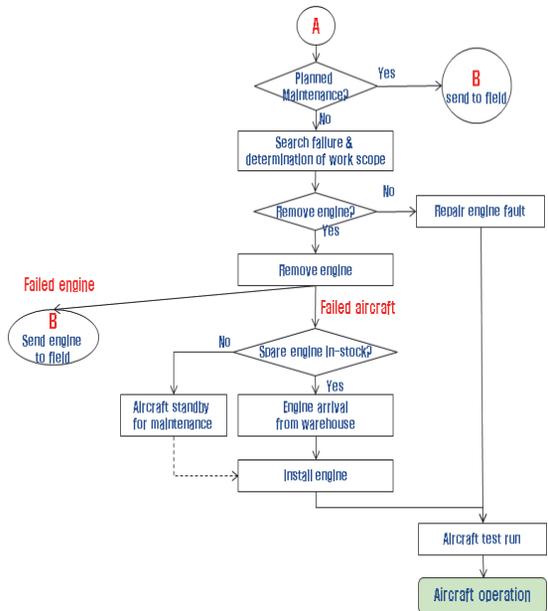


Fig. 2. Base maintenance logic

Figure 3에 야전정비 로직을 도시한다. 야전에서는 장탈된 엔진 및 모듈의 정비를 담당한다. 먼저, 엔진의 계획정비는 항공기에 장착된 엔진의 누적 비행시간이 시간이나 사이클 등 정비주기에 이르면 해당 엔진을 장탈하고 정비를 위해 창고로 송부되어 정비된다. 정비 후 비행시간이 0으로 초기화되며 야전창고로 되돌아온다. 장탈 후 예비엔진이 있을 경우 창고로부터 불출받아 항공기에 장착하고 항공기 시운전을 거쳐 다시 정상임무로 복귀한다.

모듈의 계획정비는 정비를 위하여 송부되는 엔진내 특정 모듈의 누적 비행시간이 정비주기 시간에 이르는 경우이다. 예를 들어, KF-16의 경우 TAC(Total Accumulated Cycle)이 4,300에 이르면 엔진을 분해하고 해당 모듈을 장탈한다. AUG 모듈 경우는 야전에서 직접 정비하며 기타 모듈인 경우는 창고로 송부, 정비 요청을 한다. 동시에 모듈창고로부터 보유중인 예비 모듈을 불출받아 엔진에 장착하고 모듈이 장착된 엔진은 시운전 검사를 마친 뒤 엔진창고로 보내져 저장된다. 비계획 정비의 경우 모듈장탈을 요하지 않는 경우는 야전에서 직접 엔진을 수리하고 시운전을 거친 뒤 창고에 저장한다. 엔진 고장이 모듈

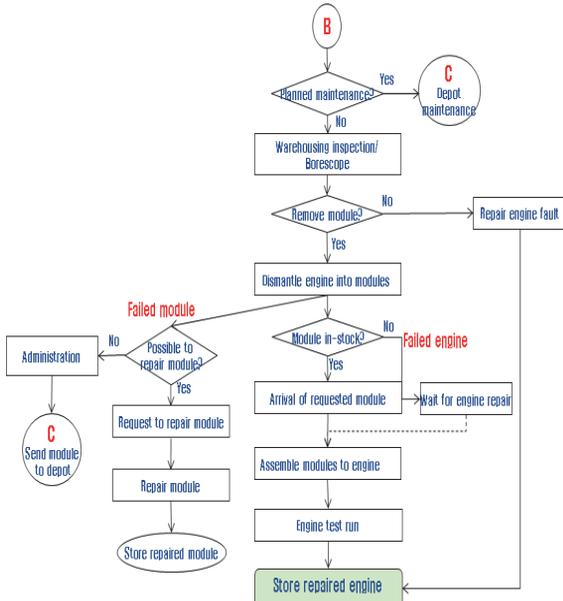


Fig. 3. Field maintenance logic

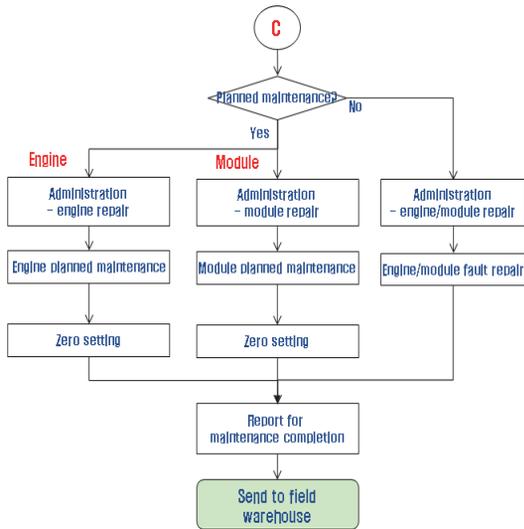


Fig. 4. Depot maintenance logic

에서 기인할 경우 해당 모듈을 장탈한 뒤 야전 또는 창에서 수리를 수행한다. 동시에 위와 같은 방법으로 창고로부터 예비 모듈을 불출받아 엔진에 장착하고 시운전을 거친 뒤 창고로 보내진다. 야전에서의 수리자원 능력은 유한 또한 무한일 수 있다. 수리자원 능력은 ‘동시에 정비를 수행할 수 있는 설비/작업조의 수’로 정의한다. 수리자원이 무한일 경우는 즉시 고장엔진/모듈의 수리가 가능하

나 유한일 경우는 수리를 위해 대기할 수 있다.

마지막으로, Figure 4는 창에서의 정비로직을 보여준다. 야전으로부터 계획 또는 비계획 정비를 위해 입고되는 엔진이나 모듈은 기준에 따라 정비된다. 정비를 마친 엔진과 모듈은 야전창고로 송부된다. 특별히, 계획 정비인 경우는 정비 후 모든 엔진과 모듈의 누적 비행시간/사이클이 0으로 초기화된다. 창 수리자원 능력은 유한 또는 무한일 수 있으나 본 연구에서는 무한을 가정한다.

### 3.3.3 시뮬레이션 프로그램 작성

본 연구의 시뮬레이션 프로그램은 ARENA 14.5를 이용하여 작성되었다. 세부 정비로직은 앞에서 설명한 바와 같으며 전체적인 프로그램 로직은 Figure 5와 같다.

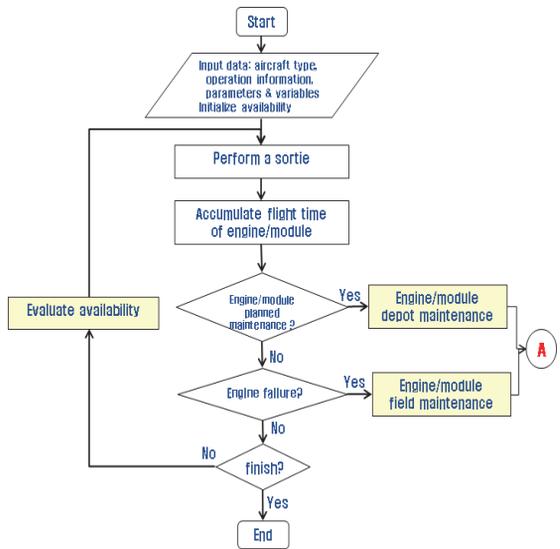


Fig. 5. Overall program logic

프로그램의 수행과 함께 항공기와 운영에 대한 다양한 정보들이 설정된다. 이들은 Table 5~Table 7에 정의된 항공기 유형, 엔진의 수량, 그리고 파라미터와 변수 값들로서 사용자 입력을 통하여 정의된다. 프로그램의 실행과 함께 항공기들은 소리에 의거하여 적당한 시간 간격으로 비행임무를 수행한다. 비행임무 수행 후 비행 시간(확률적인 값)에 따라 엔진 및 모듈들의 시간(사이클)들이 누적되어 간다. 이 누적시간이 초기에 설정한 계획정비 시간에 다다르면 해당 엔진/모듈은 장탈되고 야전 또는 창에서 정비를 받게된다. 또한 초기에 0으로 설정된 가용도는 시간의 진행에 따라 누적평균치로 산출된다.

### 4. 최적해의 도출

최적해는 OptQuest를 통하여 산출하며, 편의상 예제를 통하여 설명하기로 한다. 예제는 유형 2인 모듈형 항공기, KF-16을 선정했으며 다음 Table 8에 선정된 항공기에 대한 기본적인 정보를 도시했다. 우리의 목표는 고려되는 운영조건하에서 엔진과 모듈의 최적 예비수량을 결정함이다. 모든 비엔진 고장 및 부대의 비장탈 엔진 정비 등을 고려해서 제외하였으므로 요구되는 가용도는 0.98 이상이다.

Table 8. Example - basic information

Classification		aircraft
aircraft information	aircraft name	KF-16
	aircraft type	2
	no. of engines per aircraft	1
	no. of modules per engine	5
operation information	no. of aircrafts	**
	sortie	**
	no. for reassembly*	1
price	field repair capability	1~3
	engine	\$3,805,215
	Module 1 - FAN	\$661,260
	Module 2 - CORE	\$2,927,520
	Module 3 - FDT	\$464,808
	Module 4 - AUG	\$647,136
decision variable	Module 5 - G/B	\$118,128
	no. of spare engines	2~6
	no. of spare modules	1~5

\* 예비엔진의 대수가 이 수량 미만이고 모든 예비모듈들이 1개 이상일 때 정비시간 단축을 위하여 자동으로 모듈들을 조립하여 엔진 상태로 참고에 저장.

입력데이터는 크게 Fig. 6의 상수부분과 Fig. 7의 확률 변수 부분으로 구성된다. 이들 각각은 완제형(공통) 및 모듈형으로 구분하였으며, 사용자의 편의를 위하여 변수명 보다는 각각의 의미를 통하여 입력할 수 있도록 하였다. 마지막 줄의 계획정비를 위한 정비주기에 있어서 해당사항이 없을 경우는 매우 큰 값(예, 1000000)을 입력하도록 하였다. Fig. 7의 다양한 확률변수 모수 값들에 대해서는 편의상 가정하였다.

이제 최적해 산출을 위해 OptQuest의 세부적인 설정을 한다. 예제에서는 평균가용도 결과를 얻기 위하여 준비기간 240시간과 20년간 1회 시뮬레이션을 설정하였다. 하루를 8시간으로 가정하였기에 준비기간 240시간은 30일에 해당되며 이 기간 결과치를 제거하였다. 이들은

신뢰성 있는 결과 도출과 관련하여 중요하게 취급되어야 하는 사항이다. 일반적으로 시뮬레이션 결과는 매회 다르기 때문에 여러 회 반복함이 권장된다. 그러나, 본 논문은 특정 주어진 조건(조합)에 있어서의 안정상태가 아닌 수만가지 후보 조합들 대상의 최적해 탐색과정상 안정적인 결과를 의미하기에 조건들을 통한 최적해 탐색과정 상의 안정상태를 충족해야하는 관계로 이들 모두를 만족하는 준비기간 및 실행시간 대한 근거 제시는 어렵다. 본 연구에서 평균가용도는 시간의 흐름에 따른 누적치이며 다양한 경우에 대한 실험을 통하여 시간의 진행에 따른 평균가용도 결과를 검토한 결과 빠른 시간에 가용도의 변화가 특정 값에 도달하여 이후 매우 작은 변화를 가짐을 관측하였다. 또한 창 정비를 수행할 정도의 기간이 고려되어야 하므로 수년 정도라도 만족 가능하나 다소 주관적이지만 20년이라는 긴 기간을 고려하여 안정상태 시뮬레이션 특성을 반영하도록 하여 1회의 수행만으로 필요한 결과를 얻을 수 있도록 설계하였다.

참고로, 설정된 목적함수, 제약조건, 그리고 결정변수들은 다음과 같다.

목적함수:

$$\text{Min } Z = 3,805,214X_0 + 661,260X_1 + 2,927,520X_2 + 464,808X_3 + 647,136X_4 + 118,128X_5$$

야전 정비능력:  $1 \leq MC\_F \leq 3$   
 가용도의 고려:  $Avail \geq 0.98$   
 엔진 및 모듈의 수량:  $2 \leq X_0 \leq 6$   
 $1 \leq X_1, X_2, \dots, X_5 \leq 5$

모든 입력 및 설정을 완료한 뒤 프로그램을 실행시키면 자동으로 시뮬레이션 및 탐색 과정이 Figure 8과 같이 그래프로 보여진다. 그래프의 횡축은 설정한 시뮬레이션 탐색 회수이며 종축은 목적함수인 총 비용이다. 그래프로부터 최적해 탐색이 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

탐색 시뮬레이션을 마친 뒤 다음과 같이 최적해가 산출되었다. 즉,

예비 엔진 = 2대,  
 예비 모듈 1~5 = 4, 2, 5, 4, 2대  
 총 비용 = \$21,259,350  
 평균 운용가용도 = 0.989  
 야전 정비능력 = 3

1) OptQuest for Arena, Rockwell Automation.

1.1) Complete - Input parameter/variable (constant)	
aircraft type	- 2
no. of engines per aircraft (1,2 or 4)	- 1
no. of modules per engine (0,1,2,3,4,5)	- 5
no. of total aircrafts	- **
sorties per day	- **
(non-planned maintenance) engine removal rate (%)	- **
(planned maintenance) engine maintenance period - hrs/cycle	- 2000 1000000

\* Use a big value if not applied (ex,1000000)

1.2) Modular - Input parameter/variable (constant)	
(non-planned maintenance) module removal rate (%)	- **
no. of engines for reassembly	- 1
(non-planned maintenance) module removal - module (1,...5) related failure rate (%)	- ** ** ** ** *
field repair probability of a removed module (1,...,5) (%)	- ** ** ** ** ** ** ** ** **
planned maintenance period for each module - hrs	- 4,300 4,300 4,300 4,300 2,000

\* Use a big value if not applied (ex,1000000)

Fig. 6. Input parameters

2.1) Complete - Random Variables	
flight hours	- UNIF(*, *)
engine MTBF	- **.5+WEIB(***, **.*)
time to remove engine	- UNIF(*,*)
time to install engine	- UNIF(*,*)
(field/depot) non-planned engine repair time	- UNIF(**,**)
transportation time between depot and field (same for all engine and modules)	- WEIB(**, **.*)
(depot) planned engine maintenance time (type 1,5)	- WEIB(***, **.*)

2.2) Modular - Random Variables	
time to remove module	- UNIF(*,*)
time to install module	- UNIF(*,*)
(field) Module 1 - non-planned repair time	- WEIB(*.**, *.**)-*.***
(field) Module 2 - non-planned repair time	- WEIB(*.**, *.**)-*.***
(field) Module 3 - non-planned repair time	- GAMM(*.**, *.**)+ *
(field) Module 4 - non-planned repair time	- WEIB(*.**, *.**)-*.***
(field) Module 5 - non-planned repair time	- EXPO(*.**)-.***
(depot) Module 1 - non-planned repair time	- *.**+** • BETA(*.***, *.***)
(depot) Module 2 - non-planned repair time	- EXPO(**)
(depot) Module 3 - non-planned repair time	- *.**+** • BETA(*.**, *.**)
(depot) Module 4 - non-planned repair time	- WEIB(**, **.*)
(depot) Module 5 - non-planned repair time	- WEIB(**, **.*)
(depot) Module 1 - planned maintenance time	- NORM(***, ***)
(depot) Module 2 - planned maintenance time	- **+.WEIB(***, **.*)
(depot) Module 3 - planned maintenance time	- **+.WEIB(***, **.*)
(depot) Module 4 - planned maintenance time	- **+.EXPO(***)
(depot) Module 5 - planned maintenance time	- **+.*** • BETA(0.**.0.***)

Fig. 7. Input random variables

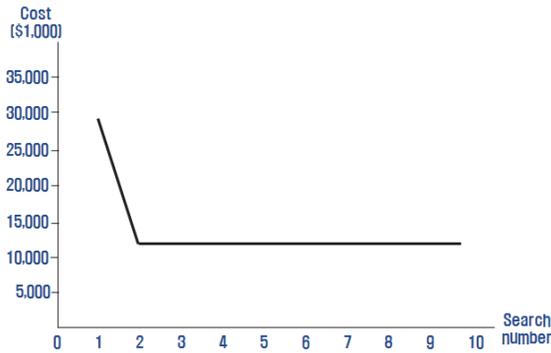


Fig. 8. Search for the Optimal Solution

이는 본 연구에서 얻고자 하는 최종 결과이다. 그러나, 때때로 얻어진 최적해가 실제의 의사결정에서 수용되지 못하거나 최적해 주변의 추가적인 가능해(feasible solution) 들을 검토하고자 할 수 있다. 비용 외에 가용도가 특히 중요하게 고려될 수 있으며 이의 중요도 정도에 따라 여러 가능한 해들 중 적절한 해를 선택할 수도 있을 것이다. 이러한 경우에 적절한 추가적인 가능해들 또한 산출되며 Table 9와 같다. 이 표의 결과들은 초기 설정한 가용도 이상의 제약을 만족하는 결과를 정리한 것으로 총 비용이 작은 것부터 큰 순서로 차례로 나열한 것이다. 가용도 열로부터 모두 설정 값 이상을 만족함을 알 수 있다. 예상되듯이 이 표의 첫째 행이 최적해이다.

예비엔진/모듈 수와 가용도/비용의 관계, 야전 정비능력과 가용도와의 관계 등을 포함한 보다 구체적인 답은 다양한 입력변수/파라미터들의 조합들에 대한 민감도 분석을 통하여 얻을 수 있다. 불행히도 확률변수와 모수 값들을 포함한 파라미터들의 조합이 무수히 많으며 이 모든 조합에 대해 민감도를 분석하는 것은 본 연구의 수준

Table 9. List of feasible solutions

Optimal ( $X_0, X_1, X_2, X_3,$ $X_4, X_5$ )	Field Maintenance Capability	Operational Availability	Total Cost
2, 4, 2, 5, 4, 2	3	0.989	21,259,350
4, 3, 3, 3, 3, 3	2	0.990	29,677,420
5, 2, 2, 1, 5, 4	1	0.998	30,376,640
6, 2, 1, 5, 4, 1	2	0.995	32,112,040
5, 3, 3, 1, 4, 1	3	0.982	32,963,900
4, 1, 5, 4, 1, 2	2	0.999	33,262,340
6, 4, 2, 5, 1, 3	2	0.998	34,656,930
4, 4, 5, 2, 5, 4	3	0.983	37,141,310
6, 3, 5, 4, 5, 1	2	0.988	44,665,710
6, 5, 5, 5, 5, 5	3	1.000	46,925,550

을 넘는다. 다만, 간단한 검토를 통하여 가용도는 야전 정비능력의 증가에 따라 향상됨이 확인되었다. 본 연구에서는 운용가용도를 고려하되 실제로 행정처리시간, 엔진/모듈의 창고 입출력시간, 창고로부터 정비소까지의 이동시간 등에 대한 상세 값들을 모두 고려하지는 않았으므로 실제의 가용도 값과는 차이가 있다.

이상과 같이 OptQuest는 시뮬레이션과의 연계를 통한 최적해 산출을 수행함을 알 수 있다. 주의할 점은, OptQuest가 모든 경우에 대하여 정확한 최적치를 찾는다라는 보장할 수 없다. 또한 너무 극단적인 입력 값, 예를 들어 매우 작은 MTBF 값의 운영조건에 매우 적은 수의 예비엔진/모듈 값을 사용할 경우 프로그램 실행이 중간에 멈출 수도 있다. 그러나, 이러한 극단적인 경우를 제외하고는 본 프로그램이 설정된 제약조건과 목적함수를 기준으로 시뮬레이션을 통한 최적해를 효과적으로 산출함에 중요한 의미를 갖는다.

### 5. 결론

본 연구에서는 공군전력의 핵심인 다양한 유형의 항공기들에 대한 예비 엔진 및 모듈의 최적 소요량 산출을 위한 방법을 제시하였다. 본 연구를 통하여 현재 및 향후 고려되는 대부분의 항공기 유형에 대한 최적 예비엔진 산출을 위한 기반이 마련되었다. 본 연구의 결과를 바탕으로 공군의 전평시 시나리오, 작전 등과의 연계 및 데이터를 이용한 프로그램의 활용을 통하여 공군의 업무에 좋은 활용이 기대된다.

본 연구의 확장으로 향후의 연구 주제들을 다음과 같이 제시한다. 첫째, 운영단계에서의 예비엔진 검토 및 구입 프로세스 정립이다. 현재는 초기 획득단계에서 필요한 예비 엔진/모듈들을 일괄 구입하며 운영단계의 추가적인 구입 절차는 마련되어 있지 않다. 초기 획득시의 가용도 예측치와 운영단계의 실제 결과가 차이를 보일 경우 치명적인 전투력 저하의 문제점이 내포된다. 매년 군수사 무기체계팀 팀장 주관으로 예비엔진 확보 및 운영수준을 재검토하여 추가 예비엔진 구매여부를 결정하도록 하는 단계적 확보개념을 적용함이 합리적인 방안으로 판단된다. 둘째, 목적함수에 대한 고려이다. 현 모델에서는 엔진과 모듈의 초기 구입비만을 고려한 목적함수를 설정하였다. 추가적인 비용요소로는 초기/추가 구입비, 엔진 및 모듈의 재고유지비, 엔진 및 모듈의 부족수량으로 인한 벌칙비용(penalty cost) 등 중요하게 고려해야 할 추가 비용요소들이 있다. 이들을 함께 고려할 경우 보다 합리적

인 의사결정이 이루어질 수 있을 것이다. 셋째는, 한국형 PRS(Propulsion Requirements System)의 구축이다. 미국 공군에서는 비록 초기 획득시 제작사 추천 수량을 참고로 예비엔진에 대한 수요를 결정하나 매년 엔진 안전 재고량 산출 시스템인 PRS를 통한 적정 수량 검토를 수행한다. 이러한 과정을 통하여 전투력 공백에 대한 문제를 방지할 뿐 아니라 feedback 과정을 통한 과학적이고 정확한 예측을 중요시 한다. 이는 궁극적으로 매우 고가의 엔진에 대한 비용을 정확히 통제하는 기반을 제공한다는 점에서 향후 우리 군에도 절실히 요구되는 사항이다.

References

군수관리단 (2011), *예비엔진/모듈 산출절차 정립 및 산출 결과*

김진호, 이상진, 정성태 (2014), 예비엔진 및 모듈 재고수준이 전시 운용가능도에 미치는 영향, *경영과학*, 제 31권, 1호, pp. 33-48.

양욱 (2014), *KODEF 군용기 연감 2014~2015*, 플래닛 미디어.

우제웅 (2000), 항공기 예비기관/모듈 적정소요 산정모형 연구, *국방정책연구* 제49, pp.115-144.

유승낙 (2003), F-16 항공기 예비엔진 및 모듈 적정재고 수준 판단 연구, 석사학위논문, 국방대학교.

윤혁, 이상진 (2008), Vari-METRIC을 개선한 다단계 재고모형의 효과 측정, *경영과학*, 제 28권, 제 1호, pp. 117-127.

이상진, 배주근, 김민규 (2010), 항공기 예비엔진 및 모듈 재고수준이 운용가능도에 미치는 영향, *품질경영학회*, 제38권, 제3호, pp.333-339.

이순호 (2001), *ARENA를 이용한 수리순환품목 적정재고수준 판단 모델 연구*, 국방대학교.

Graves, S. C. (1985), A Multi-Echelon Inventory Model for a Recoverable Item with one-for-one Replacement, *Management Science*, vol., 31, pp. 1247-1256.

Hillestad, R. J. and Carrillo, M. J. (1980), *Models and techniques for recoverable item, stockage when demand and the Repair Process are nonstationary - part I: performance measurement*, Rand Corporation Report No. N-1482-AF, The Rand Corporation, Santa Monica.

Hillestad, R. J. (1982), *Dyna-Metric: Dynamic Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*,

R-2785-AF, The Rand Corporation, Santa Monica.

Kruse, K. C. (1979), *An Exact N Echelon Inventory Model: The Simple Simon Method*, U.S. Army Research Office, Technical Report TR 79-2.

Lee, H. L. (1987), A multi-echelon inventory model for a repairable item with emergency lateral transshipments, *Management Science*, Vol. 31, pp. 1247-1256.

Laguna, M. (2011), OptQuest, *Optimization of Complex Systems*, Opttek Systems, Inc.

Madu, C. N. and Kuei, C. (1992), Simulation Metamodels of System Availability and Optimum Spare and Repair Units, *IE Transactions*, 99-104.

Mudstadt, J. (1973), A Model for a Multi-Item, Multi-Echelon, Multi-Indenture Inventory System, *Management Science*, vol. 20, pp. 472-481.

O'Malley, T. J. (1983), *The Aircraft Availability Model: Conceptual Framework and Mathematics*, Logistics Management Institute, Washington, D.C.

OptQuest(2011), *Optimization of Complex Systems*.

Sherbrooke, C. C. (1968), METRIC: A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control. *Operations Research*, Vol. 16, pp. 122-141.

Sherbrooke, C. C. (1986), Vari-METRIC: Improved Approximations for Multi-Indenture, Multi-Echelon Availability Models, *Operations Research*, Vol. 34, no. 2, pp. 311-319.

Sherbrooke C. C. (1992), Multi-echelon inventory systems with lateral supply, *Naval Reserch Logistics*, Vol. 39, pp. 29-40.

Sherbrooke, C. C. (2004), *Optimal Inventory Modeling of System, Multi-Echelon Techniques*, Second Edition, Kluwer Academic Publishers.

Simon R. M. (1971), Stationary Properties of a Two-echelon Inventory Model for Low-demand Items, *Operations Research*, vol. 19, pp. 761-773.

Slay, M. F. (1980), Vari-METRIC: *An Approach to Modeling Multi-echelon Resupply when the Demand Process is Poisson with a Gamma Prior*, Working paper, Logistics Management Institute, Washington, D.C.

Stears III, D. E. (1998), *Logistics Simulations Metamodel for F404-GE-400 Engine Maintenance*, Naval Postgraduate School.



**전 태 보** (tbjeon@kangwon.ac.kr)

1982 고려대학교 산업공학과 공학사  
1985 미국 Auburn University, Industrial Engineering, MS  
1989 미국 Auburn University, Industrial Engineering, Ph.D  
1990~ 현재 강원대학교 시스템경영공학과 교수

관심분야 : 신뢰성, 시물레이션, 국방 M&S, 최적화모델링



**손 영 환** (yhsohn@sejong.ac.kr)

1982 고려대학교 산업공학과 공학사  
1984 한국과학기술원 산업공학과 공학석사  
1998 한국과학기술원 산업공학과 공학박사  
1984~1988 육군사관학교 전임강사  
1988~2002 한국국방연구원 연구위원  
2002~2004 Saint Louis University 객원연구교수  
2004~2005 University of Louisville UPS Foundation Post-doctoral Fellow  
2005~2008 안보경영연구원 분석평가연구센터 소장  
2008~2010 (주)기술과가치 국방기술경영센터장  
2010~2013 (주)삼네트 기술경영분석연구소 소장  
2014~ 현재 세종대학교 국정관리연구소 부소장/연구교수, 방위사업청 자문위원

관심분야 : 모델링&시물레이션, Combat Analysis, 신뢰성 분석



**김 기 동** (kdkim@kangwon.ac.kr)

1989 서울대학교 산업공학과 학사  
1991 서울대학교 산업공학과 석사  
1997 서울대학교 산업공학과 박사  
1998 고등기술연구원 선임연구원  
1998~ 현재 강원대학교 시스템경영공학과 교수

관심분야: MIS, 생산정보시스템, 스케줄링, 최적화