

정비능력, 예비품 수량 제약조건 하에서의 운용가용도 시뮬레이션 연구

A Study on the Simulation about Operation Availability under Maintenance Capacity and Repair Part Constraints

박세훈* · 문성암** · 이정환***

Park, Se-Hoon* · Moon, Seong-Am** · Lee, Jung-Hwan***

Abstract

This study introduces the system dynamics model that simulate total operational availability when 10 equipments made of 3 major components are serviced under the constrains of the maintenance capacity level and the number of spare parts. This simulation is designed on the base of reliability engineering concept so failures of components happens with the rule of engineering factors like the mean time between failure(MTBF) of component and the next failure time of one component is effected by the conditions of other components. We analysed availability of 10 equipments under 121 constrains and executed multiple regression analysis with the simulation result. The analysis provide the managerial insight in the service fields with operation many equipments.

Keywords: 운용가용도, 신뢰성 공학, 수리부속, 시스템 다이내믹스, 시뮬레이션
(Operational Availability, Reliability Engineering, Repair Part,
System Dynamics, Simulation)

* 국방대학교 국방관리대학원 박사과정 (제 1저자, fox6410@paran.com)

** 국방대학교 국방관리대학원 교수 (공동저자, mseongam@hotmail.com)

*** 광운대학교 방위사업학과 박사과정 (공동저자, do1so2@gmail.com)

I. 서론

과학기술이 발전됨에 따라 항공기, 차량, 생산설비, 전자기기 등 각종 장비의 기능이 향상되고 있으나, 설계의 복잡도와 유지보수의 난이도는 높아지고 운영유지비는 증가하고 있다. 이러한 조건에서 여러 대의 장비를 지속적으로 운영해야 하는 항공사, 운송업체, 군대 등 현대화된 장비를 운영하는 조직은 각종 제약조건 하에서 적절한 수준의 장비가동률을 유지하기 위하여 노력하고 있다(Blanchard, 1992; 손희민 등, 2008). 만약 자원이 충분하다면 장비의 운용가용도(operation availability)를 높은 수준에서 유지하는 것이 쉽겠지만, 현실적으로는 경제적인 제약으로 인해 운용가용도를 희망하는 수준으로 유지하기가 쉽지 않다. 이러한 제약은 정비능력과 예비품 수량 등의 형태로 나타나며 시간의 흐름에 따라 전체 시스템의 성과에 영향을 미친다. 이러한 시스템의 분석을 위해서는 가동시간에 따라 상이하게 나타나는 구성품(component)들의 고장률(failure rate)과 같은 공학적인 요소를 고려한 시물레이션이 필요하다(이치우 등, 2004; 김원경, 2005; 임태진, 2005; 김준홍 등, 2007; 서순근 등, 2008).

수많은 구성품으로 이루어진 장비의 경우, 구성품 상호간의 영향관계가 복잡하게 작용하기 때문에 구성품들간의 상호작용을 고려하지 않고 시계열 분석을 통한 연구를 하기도 한다(박영진, 2008). 그러나 최근의 장비들은 총소유비용(TOC: total ownership cost)을 줄이기 위하여 설계 초기단계부터 고장간 평균시간(MTBF: mean time between failure 이하 MTBF)과 같은 구성품의 공학요소를 식별하고 있다(Blanchard, 1992; 정용길, 2008; 정일환 등, 2009). 이런 경우에는 각각의 구성품들과 장비 운용가용도와의 인과관계를 잘 묘사할 수 있는 시물레이션이 시계열 분석보다 운용가용도의 변화를 정확하게 관찰할 수 있다. 시물레이션 방법론은 비용 소모적인 시행착오 없이도 다양한 제약조건에 따른 운용가용도의 변화를 관찰할 수 있어서 경제성이 입증된 우수한 방법론이라고 할 수 있다(Kelton 등, 2007; 장상철 등, 2008).

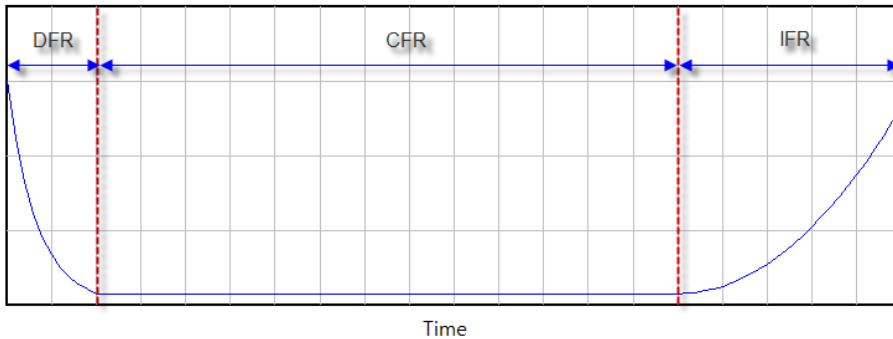
본 연구에서는 정비능력(maintenance capacity)과 예비품(spare part) 수량의 제약조건 하에서 다수의 구성품으로 이루어진 장비의 운용가용도를 동적으로 관찰하는 것이 목적이다. 고장의 발생개념은 단순히 운영시간이 누적되면 고장이 발생하는 방법이 아니라 구성품 상호간에 영향을 주면서 고장이 발생하는 신뢰성 공학 개념을 기반으로 모델링하였다. 그리고 독립변수는 각각 11개의 조건을 갖는 제약조건으로 하고, 시물레이션 결과 관찰된 운용가용도를 종속변수로 하여 다중회귀분석을 실시한다. 본 연구의 주목적은 제약조건 하에서의 장비 운용가용도의 변화에 대한 시물레이션 연구이므로 고가의 장비를 운영하는 다양한 분야에서 일반화할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 2장에서는 제약조건 하의 운용가용도 모델링의 기본 개념인 신뢰성 공학의 주요 개념을 검토한다. 3장에서는 모델링을 위한 연구설정 및 가정을 설명한다. 4장에서는 신뢰성 공학 기반의 고장발생 모듈, 고장발생, 탈착, 대기, 정비, 저장, 장착되는 구성품의 상태전이 모듈, 정비능력의 제약 모듈과 성과측정 모듈의 시뮬레이션 모델을 설명한다. 5장에서는 시뮬레이션의 결과를 기반으로 다중회귀분석을 실시한다. 끝으로 6장에서는 시뮬레이션의 주요 결과를 요약하고 시뮬레이션 방법론 활용의 의의를 종합한다.

II. 이론적 배경

정비는 시스템 고장을 예방하거나 고장이 발생한 시스템의 기능을 회복시켜 주기 위하여 수행되는데, 특히 원자력, 항공, 방위, 조선 등의 산업분야에서는 정비와 신뢰성 관계의 중요성을 인식하고 있으며 많은 기업들이 신뢰성중심정비(RCM: reliability centered maintenance) 활동을 수행하고 있다. 신뢰성중심정비는 정비비용, 효율성 및 통제 개선을 통하여 운용가용도를 향상시키는 주요 도구이며, 수명주기비용(LCC: life cycle cost), 로지스틱스 지원, 예비품(spare part) 배분, 작업자 수준분석 등의 분야에서 중요한 기초자료를 제공한다(서순근 등, 2008). 따라서 본 연구에서 장비 운용가용도 모델링은 신뢰성 공학을 기반으로 하는데, 이는 각각의 구성품의 고장발생은 시뮬레이션이 진행되는 동안 다른 구성품의 고장발생에 주는 영향을 묘사할 수 있다.

장비 고장률의 대표적인 형태는 [그림 1]과 같은 욕조 곡선(bathtub curve)이다. 전체 수명기간 중에서 초기에는 장비나 부품의 고장률이 감소하는 ‘감소형(DFR: decreasing failure rate)’으로 와이불 분포가 주로 쓰이며, 안정기에는 상당기간 동안 고장률이 일정한 수준을 유지하는 ‘유지형(CFR: constant failure rate)’으로 지수분포 형태가 많이 쓰이고, 제품의 노후화가 진행되면서 다시 고장률이 증가하는 ‘증가형(IFR: increasing failure rate)’은 ‘감소형’과 마찬가지로 와이불 분포 형태가 주로 쓰인다. 수리가 가능한 시스템에서의 연속적인 고장간 간격시간 평균을 MTBF(mean time between failure)라고 하며, 고장률(λ)은 MTBF의 역수로 나타낸다(이치우 등, 2004; 임태진, 2005; 김준홍 등, 2007; 서순근 등, 2008).



[그림 1] 장비 고장률의 욱조곡선

장비의 운용기간 중 사용되는 성과측정지표로는 운용가용도 A_o (operational availability)가 있는데, 이는 사용하는 시스템이 임무기간에 대해 요구된 기능을 수행할 수 있는 기간의 평균비율로 정의되며 식 (1)과 같다. 만약 장비가 여러 대라면 모든 장비의 총가용시간을 모든 장비의 총운용시간으로 나누어 산출한다. 이것이 실제 시스템의 가용도가 된다.

$$\text{운용가용도 } A_o = \text{총가용시간} / \text{총운용시간} \quad (1)$$

본 연구에서 제약조건으로 간주하는 정비능력과 예비품 수량은 주로 경제적인 이유로 발생한다(Jones, 2006; 이춘섭 등, 1999; Jones, 2006). 물론 충분한 정비능력을 구비하면 좋겠지만 경제적인 문제로 인해서 정비능력의 수준을 결정할 필요가 있다. 정비능력은 정비사, 정비지원장비나 정비공간이 될 수 있다. 장비의 구성품들은 각각 수리복구를 위하여 요구되는 정비능력이 다르며, 정비능력이 충족된다면 정비상태로 변경되고, 일정한 시간이 흐르면 정상적인 기능을 보장하는 상태로 복구되어 창고에 입고된 후 해당 구성품이 탈착되어 있는 장비에 장착된다. 역시 경제적인 이유로 구성품에 대한 예비품을 충분하게 구매하지 못하게 되는데, 특히 항공기 구성품과 같이 고가의 경우에는 더욱 그러하다. 장비에 장착되어 있는 구성품 이외에도 초기에 일정 수량의 예비품이 있으며, 이 예비품 수량의 제약에 따라 운용가용도가 영향을 받는지 판단한다.

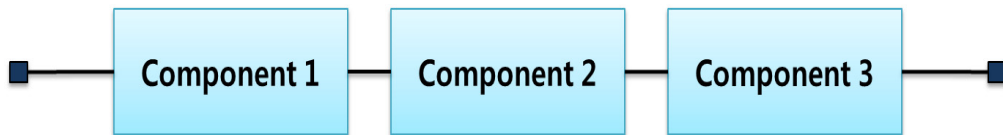
신뢰성 공학을 기반으로 고장발생 구조 구현하고 정비능력과 예비품 수량의 제약조건을 더하여 구성한 시스템 다이내믹스 모델은 유기적인 시스템 내에서의 다양한 결과를 산출하여 주기 때문에 각각의 제약조건에 대한 경제적인 한계점을 확인할 수 있는 시각을 제시할 수 있다.

Ⅲ. 시뮬레이션 모델

1. 연구설정 및 가정

본 연구의 목적은 제약조건 하에서 다수의 장비들이 서로 인과관계를 형성하는 전체 시스템을 시간에 따라 관찰하고 장비 각각의 운용가용도와 전체 운용가용도를 산출하는 것이므로 시스템 다이내믹스 모델을 이용하였다. 시스템 다이내믹스는 저장(stock)변수와 유량(rate)변수를 이용하여 복잡한 시스템의 동적행태를 모델링하기에 적합하여, 변수간의 관계로 이루어진 루프에 대한 모델링을 통하여 시간의 선후관계에 따른 영향과정을 반영할 수 있기 때문이다(Forrester, 1961). 모델에서 사용된 공학적인 개념들은 신뢰성 공학을 기본으로 하였다.

본 연구목적을 달성하기 위하여 기본 모델에서의 장비는 [그림 2]와 같이 구성품별로 각각 상이한 MTBF, 개당 필요정비능력(Capacity Requirement per Unit), 정비시간(Repair Time)을 갖는 3개의 구성품을 직렬구조(series structure)로 연결하였다. 전체 시스템은 3개의 구성품이 직렬로 연결된 장비 20대로 구성하였다. 여기에 정비능력과 예비품 수량으로 제약조건으로 설정하고 각각의 제약조건에 11개의 시나리오를 반영하여 모두 121개의 시나리오를 설정하였다. 각 시나리오에 대하여 난수발생 seed를 달리하여 30회씩 시뮬레이션을 실행하였으므로 총 3,630회의 시뮬레이션을 실행하였다. 연구의 시나리오는 <표 1>과 같이 요약된다.



[그림 2] 모델링에 사용되는 장비의 신뢰성 블록도(RBD: reliability block diagram)

〈표 1〉 연구 시나리오 설정

제약조건	시나리오	시나리오 설정	제약조건 범위	시행횟수
정비능력 (Maintenance Capacity)	11개	pool로 구성된 정비능력으로 총 20대의 장비 구성품에 대하여 정비 지원	0 ~ 10 (간격 1)	30
예비품 수량 (Number of Repair Part)	11개	각 구성품별로 예비품 수량을 11개의 조건으로 설정	0 ~ 10 (간격 1)	30

각 장비는 운용가용도에 치명적인 영향을 주는 구성품 3종류가 있으며, 다른 부품은 고려하지 않는다. 구성품들의 고장률은 각각의 MTBF 수준을 유지하는 CFR로 가정하며, 지수분포를 따른다. 각 구성품은 직렬로 연결되어 있기 때문에, 3개 중 하나의 구성품이라도 고장이 발생되면 장비는 해당 구성품이 대체될 때까지 불가동 상태가 된다. 고장이 발생되면 바로 탈착하여 정비대기 상태로 변경된다. 불가동 상태의 장비에서 사용가능한 구성품을 탈착하여 다른 장비를 복구시키는 경우는 배제하였다.

각 장비의 구성품은 각각 수리복구를 위하여 요구되는 정비능력이 다르다. 정비대기 중인 구성품은 수리복구에 필요한 정비능력이 충족된다면 정비상태로 변경되며, 일정한 시간이 흐르면 정상적인 기능을 보장하는 상태로 복구되어 창고에 입고된다. 입고된 구성품은 해당 구성품이 탈착되어 있는 장비에 장착된다. 구성품의 창고재고는 예비품의 수를 초기값으로 한다. 창고재고는 고장정비가 끝난 구성품이 입고되면 증가하고, 고장으로 구성품이 탈착된 장비를 복구하기 위하여 출고됨으로써 감소한다. 이 때 구성품의 폐기나 추가구매는 고려하지 않는다.

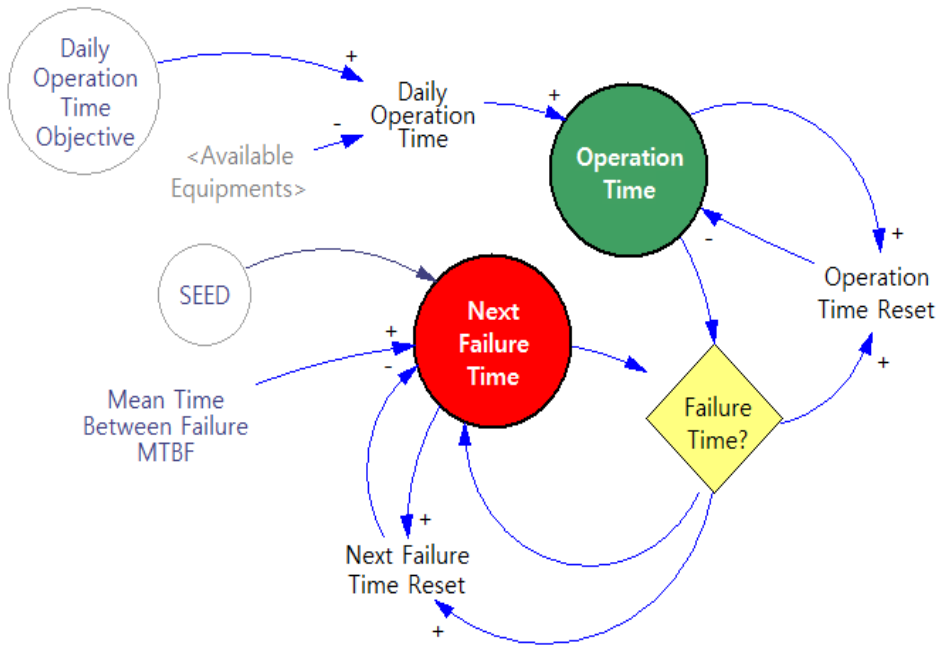
시뮬레이션 시간은 일 단위이며 기간은 2,000일로 시행된다. 초기값의 영향을 제거하기 위하여 0 ~ 1,000일의 결과를 제외하기 때문에 시나리오당 관측치는 1,000개가 된다. 시뮬레이션의 주요 파라미터는 크게 제약요소과 일반요소로 구분될 수 있으며, 제약요소는 정비능력과 예비품의 수로 각각 11개의 조건을 갖고, 일반요소는 구성품별로 각각 3개의 값을 갖는다. 구체적인 내용은 다음의 <표 2>와 같다. 121개의 각 제약조건 하에서 난수 발생 seed를 달리하여 30회를 시행한다.

〈표 2〉 주요 파라미터 설정

변수	값	변수	값
장비대수 (Total Equipment)	20 EA (Equipment1 ~ Equipment20)	총 정비능력 (Initial Capacity)	0 ~ 10 Dimensionless (1단위씩 11개)
구성품 (Component)	(Component1 ~ Component3)	예비품의 수 (Initial Spair Part)	0 ~ 10 EA (1단위씩 11개)
대당 일일운영시간 목표 (Daily Operation Time Objective per Equipment)	8 HR / (EA * DAY)	구성품 수리시간 (Repair Time)	20, 40, 60 DAY (구성품별)
일일운용시간 목표 (Daily Operation Time Objective)	160 HR / DAY	개당 필요정비능력 (Capacity Requirement per Unit)	10, 20, 30 Dimensionless (구성품별)
MTBF (Mean Time Between Failure)	1,000, 2,000, 3,000 HR (구성품별)	장비당 구성품 수 (Qty per Equipment)	1 EA (구성품별)

2. 고장발생

고장발생은 시뮬레이션에서 변화를 유발하는 근원이 되며, 다음사건 시뮬레이션(next event simulation)의 개념을 적용하였다. 이는 가장 일반적인 시뮬레이션 방법으로 복잡한 시스템의 가용도 분석에도 적용 가능한 가장 범용적인 분석방법으로, 확률적인 사건(부품 고장 등)들이 컴퓨터 모델에서 생성되고 계획된 사건(정비활동 등)과 상태기반 사건들이 발생되므로 시뮬레이션 수행 결과 실제 수명 시나리오와 유사하게 나타난다(서순근 등 2008). 고장발생은 [그림 3]과 같다. 구성품의 고장은 장비의 운영이 안정화된 CFR이며 MTBF의 지수분포를 사용하였다. 장비의 가동시간(Operation Time)이 누적됨에 따라 구성품의 가동 시간도 누적되며 미리 계산되어 있는 구성품의 차기고장시간(Next Failure Time)과 같아지면 고장이 발생된다.



[그림 3] 차기 고장시간 다이어그램

이 과정에서의 차기고장시간(Next Failure Time)은 MTBF에 의한 지수함수이므로 구성품의 교체가 이루어 지는 시점에서 $Y = 1 - \exp(-T/MTBF)$ 를 역변환한 식 $T = F^{-1}(Y) = -MTBF * \ln(1 - Y)$ 에 임의의 난수를 대입함으로써 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Next Failure Time} = & \text{INTEG} (\text{IF THEN ELSE} (\text{"Failure Time?"} = 1, \\ & - \text{MTBF} * \text{LN}(1 - \text{RANDOM UNIFORM} (0, 1, \text{SEED})), 0) \\ & - \text{Next Failure Time Reset}, 0) \end{aligned} \quad (2)$$

구성품의 가동시간(Operation Time)은 구성품이 교체된 시점부터 장비의 가동시간이 누적되고, 고장이 발생한 시점에서 초기화된다. 구성품의 가동시간은 식 (3)과 같다.

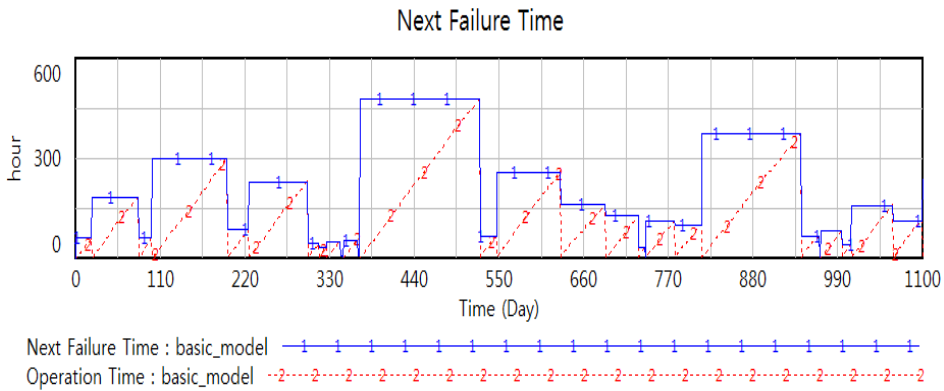
$$\text{Operation Time} = \text{INTEG}(\text{Operation Time In} - \text{Operation Time Reset}, 0) \quad (3)$$

고장시간판단("Failure Time?")은 기본적으로 "0"의 값을 갖지만, 구성품의 누적된 가동시간이 차기고장발생시간과 같아지는 시점에서 "1"의 값으로 변하며, 모델에서 구성품의 상

태를 탈착시켜 정비대기로 변화시킨다. 고장시간판단 식은 식 (4)와 같다.

$$\text{"Failure Time?"} = \text{IF THEN ELSE (Operation Time} \geq \text{Next Failure Time, 1, 0)} \quad (4)$$

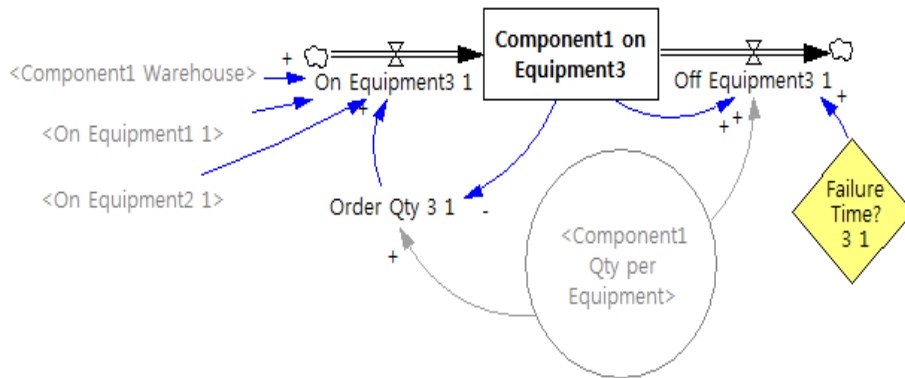
그 결과 단일 구성품으로 이루어진 단일장비의 경우 [그림 4]와 같은 차기고장시간이 발생된다. 불연속구간은 누적된 가동시간이 차기고장발생시간과 같아지는 시점에서 차기고장 발생시간을 재계산함으로써 발생된다.



[그림 4] MTBF가 100일 때 지수분포에 의한 차기고장시간 발생 결과

3. 구성품의 상태전이

고장발생 모듈에 의해 고장이 발생한 구성품은 장비3의 구성품1을 예를 들면 [그림 5]와 같이 탈착되며 식 (5)과 같다. 창고에 입고중인 구성품은 장비 고장에 의하여 구성품이 탈착되었을 경우에 장비 장착량에 비해 부족한 수량만큼 주문되고 창고에서 지원 가능한 수량만큼 출고되어 장비에 장착되며 식 (6)와 같다.

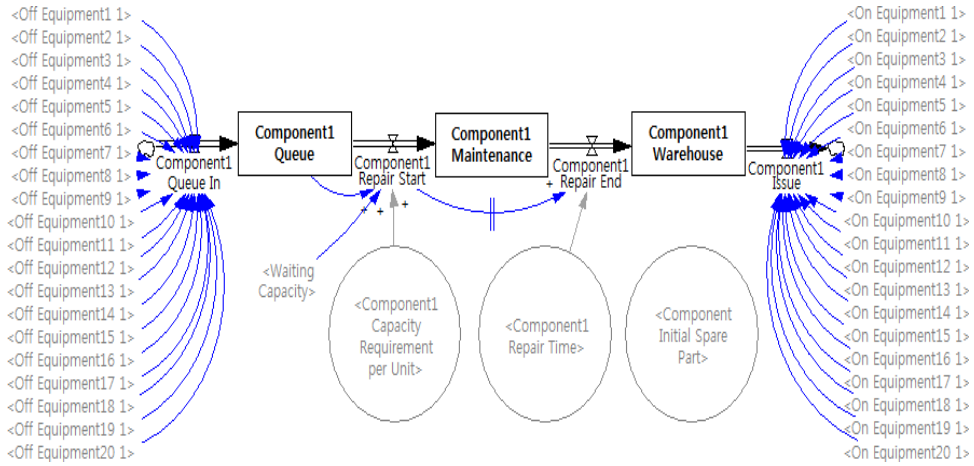


[그림 5] 구성품의 장착과 탈착 다이어그램

Off Equipment3 1 = IF THEN ELSE("Failure Time?3 1" = 1 :AND: Component1 on Equipment3 = Component1 Qty per Equipment, Component1 Qty per Equipment, 0) (5)

On Equipment3 1 = IF THEN ELSE(Component1 Warehouse >= Order Qty3 1, Order Qty3 1, 0) (6)

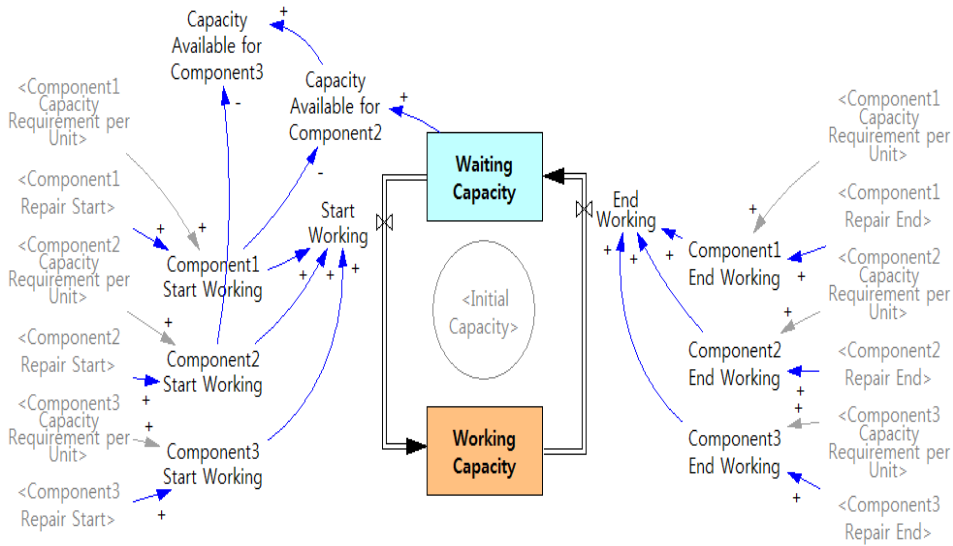
탈착된 구성품의 상태변화는 구성품1의 예를 들면 [그림 6]과 같으며, 탈착된 구성품은 정비대기(Component1 Queue)하게 되며, 정비능력의 여유와 우선순위에 따라 수리시작(Component1 Repair Start)되어 정비상태(Component1 Maintenance)로 전이된다. 정비능력 투입의 우선순위는 MTBF가 짧은 구성품 순이다. 정비 중인 구성품은 해당 구성품별로 상이한 수리시간(Component1 Repair Time)이 지나면 수리종료(Component1 Repair End)되어 창고(Component1 Warehouse)에 입고 처리된다.



[그림 6] 구성품의 상태변화 다이어그램

4. 정비능력의 제약

정비대기 중인 구성품(Component in Queue)은 각각 개당 필요정비능력(Capacity Requirement per Unit)이 설정되어 있어서 대기 중인 정비능력(Waiting Capacity)이 충분할 경우에만 정비상태(Component in Maintenance)로 전이된다. [그림 7]과 같이 구성품이 정비상태로 전이되기 위한 필요조건인 대기 중인 정비능력의 여유가 있을 경우 작업 중인 정비능력(Working Capacity)으로 전이되고, 정비 중인 구성품이 수리가 종료되면 작업 중인 정비능력은 대기 중인 정비능력으로 전이된다. 대기 중인 정비능력은 먼저 MTBF가 가장 짧은 구성품 정비에 할당되며, 식 (7), 식 (8)과 같이 발생한다.



[그림 7] 정비능력 제약 모듈

$$\text{Component Repair Start} = \text{MAX} (0, \text{MIN} (\text{INTEGER}(\text{Waiting Capacity} / \text{Component Capacity Requirement per Unit}), \text{Component Queue})) \quad (7)$$

$$\text{Component Repair End} = \text{DELAY FIXED} (\text{Component Repair Start}, \text{Component1 Repair Time}, 0) \quad (8)$$

5. 성과측정 모듈

성과측정은 전체 장비의 운용가용도(Total Operational Availability)를 측정하는데, 그 중 결과 분석을 위한 중속변수는 장비의 운용가용도가 된다. 장비가 다수의 구성품으로 직렬 연결되어 있는 경우, 각각의 구성품이 모두 가동상태일 경우에만 장비는 가동상태가 된다 (Equipment Status = 1). 각 운용가용도는 모델에서 식 (9), 식 (10)과 같이 표현한다.

$$\text{Component Operational Availability} = (\text{Component Available Time} / \text{Time}) * 100 \quad (9)$$

$$\text{Equipment Operational Availability} = (\text{Equipment Available Time} / \text{Time}) * 100 \quad (10)$$

IV. 시뮬레이션 결과분석

시뮬레이션은 안정화 기간 1,000일을 포함하여 총 2,000일에 대하여 시행하였으며, 1,000일에 대한 결과가 분석에 이용되었다. <표 1>과 같은 연구 설정을 기준으로 121개의 시나리오 별로 난수 seed를 달리하여 30회씩 총 3,630회의 시뮬레이션을 수행하였다. 정비능력과 예비품 수량의 제약조건 차이에 따른 운용가용도 성과 평균은 <표 3>과 같다. 각 연구 설정별 운용가용도 평균의 차이에 대한 이원분산분석 결과, 정비능력과 예비품 수량의 상호작용효과는 $F=17.379$, $p\text{-value}=.000$ 으로 상호작용효과가 있다고 할 수 있다. 정비능력과 예비품 수량의 주효과는 각각 $F=14,013.046$, $p\text{-value}=.000$ 과 $F=188.370$, $p\text{-value}=.000$ 으로 두 제약조건 모두 운용가용도의 차이를 발생시키는 것으로 확인되었다.

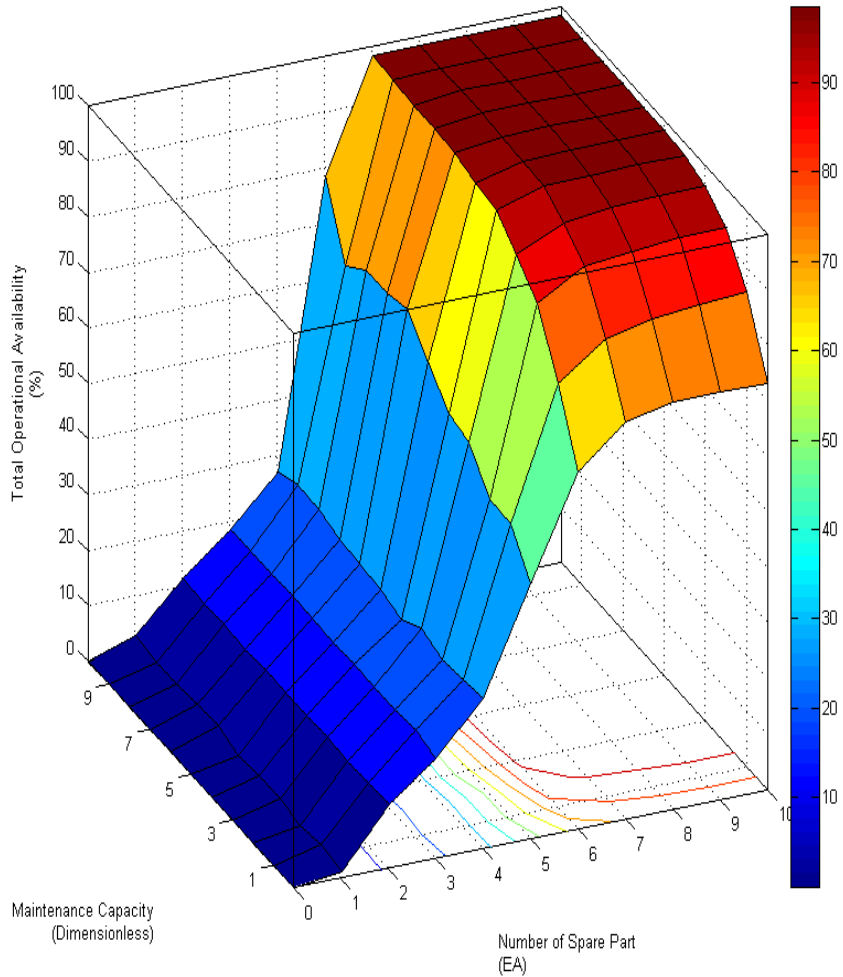
<표 3> 정비능력과예비품수량시나리오에따른시뮬레이션운용가용도평균

(운용가용도 단위:%)

예비품 수량 (0 ~ 10 EA)	정비능력 수준 (0 ~ 10 Dimensionless)											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	평균	-	1.26	11.44	18.06	26.97	46.04	64.26	71.63	73.23	73.48	73.12
	표준오차편차	-	1.27	1.27	1.51	1.39	1.73	1.92	2.95	3.54	5.35	5.02
1	평균	-	1.92	11.27	19.03	26.36	52.57	76.28	82.36	84.09	85.07	85.60
	표준오차편차	-	0.97	1.07	1.36	1.59	2.08	2.08	2.76	4.22	7.53	6.21
2	평균	-	1.22	11.03	18.64	25.81	53.09	86.56	91.39	92.21	92.99	92.99
	표준오차편차	-	1.22	1.04	1.27	1.47	1.44	2.08	2.16	5.05	12.60	10.46
3	평균	-	2.00	11.28	18.73	27.41	59.20	91.28	95.14	96.22	96.37	96.48
	표준오차편차	-	1.18	0.82	1.19	1.57	1.50	1.98	3.92	6.48	10.61	15.74
4	평균	-	2.11	11.07	18.67	24.99	60.26	95.02	97.71	97.64	97.95	97.79

	표준 오차 편차	-	1.40	1.30	1.42	1.56	1.58	2.60	2.29	3.72	11.69	16.29
5	평균	-	1.60	11.32	18.56	26.34	65.49	96.02	98.00	98.38	98.32	98.44
	표준 오차 편차	-	1.15	1.27	1.26	1.58	2.20	2.13	2.46	2.98	17.50	16.74
6	평균	-	2.95	11.27	18.87	26.75	70.93	97.14	98.43	98.51	98.48	98.50
	표준 오차 편차	-	1.14	1.35	1.45	2.36	2.33	1.93	3.74	4.53	17.36	17.27
7	평균	-	2.67	10.92	18.80	27.01	69.66	97.69	98.54	98.54	98.55	98.57
	표준 오차 편차	-	1.15	1.50	1.34	1.66	1.79	2.06	5.22	6.99	17.00	22.30
8	평균	-	2.28	11.38	18.66	28.56	69.62	97.70	98.55	98.56	98.54	98.54
	표준 오차 편차	-	1.33	1.64	1.54	1.73	1.78	1.58	2.93	11.35	21.23	11.29
9	평균	-	1.97	10.99	18.64	28.61	66.33	98.14	98.53	98.55	98.55	98.57
	표준 오차 편차	-	1.11	1.18	1.36	1.65	1.78	2.12	3.84	6.90	21.07	20.17
10	평균	-	2.88	11.36	18.35	26.98	78.56	98.36	98.56	98.56	98.56	98.55
	표준 오차 편차	-	0.87	1.02	1.47	1.93	1.67	2.43	2.68	11.92	22.04	10.20

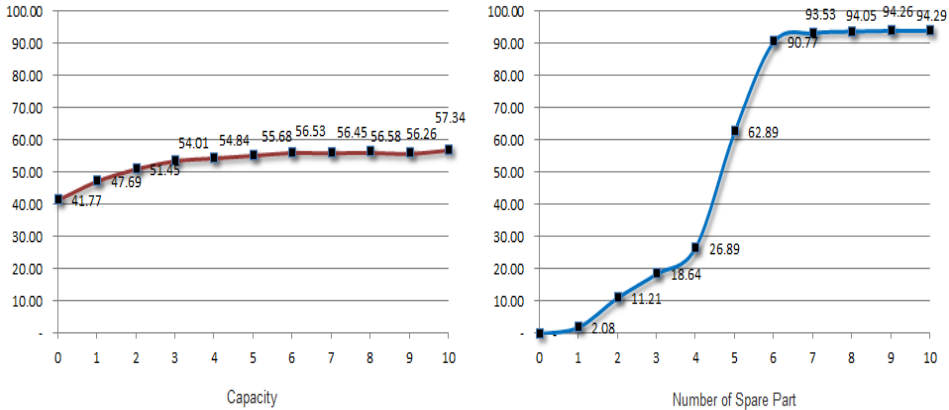
<표 3>의 결과를 그래프로 나타내면 [그림 8]과 같다. 만약 전체 장비의 운용가용도를 70% 이상으로 유지하기 위해서는 [그림 8]에서 입체표면이 운용가용도 축에서 70% 이상인 영역에 해당하는 정비능력과 예비품 수량의 값을 찾으면 된다.



[그림 8] 정비능력과 예비품 수량 제약에 따른 장비 운용가용도 시뮬레이션 결과

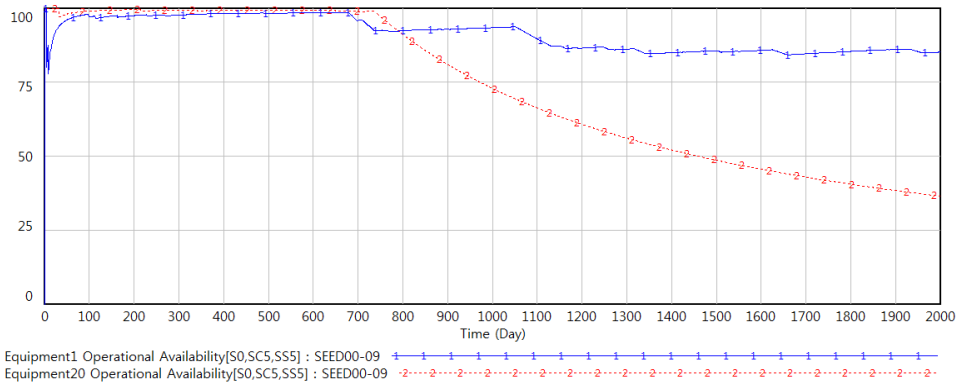
제약조건에 따른 운용가용도 결과의 프로파일을 보면 [그림 9]와 같다. 정비능력 제약의 경우에는 정비능력을 기준으로 0에서 10까지 11개 조건에 대하여 각각 330개 총 3,630개의 결과를 평균하여 본 결과 운용가용도가 완만한 곡선의 형태를 보이고 있으며, 변화의 폭은 41.77% ~ 57.64%로 크지 않다. 예비품 수량의 경우에는 0개에서 10개까지 11개의 조건에 대하여 S형태의 곡선을 보여주고 있으며, 그 변화의 폭은 0% ~ 94.29%로 정비능력 제약에 비해서 아주 넓다. 이 모델의 경우 정비능력의 제약보다는 예비품 수량의 제약

이 크기 때문에 만약 예산이 허용한다면 구성품의 예비품을 늘리는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 그러나 예비품의 수가 6개 이상이면 운용가용도를 크게 향상시키지 못한다.



[그림 9] 제약조건에 따른 운용가용도 프로파일

[그림 10]은 특정 제약조건 하에서의 특정 장비의 운용가용도의 변화를 보여준다. 장비 1이 80% 수준에서 안정화되는 반면에 최하의 정비지원 우선순위를 갖는 장비 20의 경우는 740일이 지나면서 운용가용도가 30% 수준이하로 저하된다. 동적으로 변화하는 운용가용도의 상한과 하한은 서비스 실패에 따른 페널티 수준을 예상할 수도 있으며, 이를 방지하기 위하여 구성품의 운용수준을 유지하기 위한 정비능력의 확장이나, 구성품의 수리에 필요한 소모성 수리부속의 수요를 예측할 수 있다.



[그림 10] 정비능력 수준 5, 예비품 수량 5일 경우의 장비1, 20의 운용가용도 변화

시뮬레이션에서 설정한 시나리오의 운용가용도를 제약조건인 정비능력과 예비품 수량으로 다중회귀분석한 결과는 <표 4>와 같다. 회귀분석결과를 식으로 나타내면 식 (10)과 같으며, 본 연구의 설정에서는 정비능력이 예비품 수량보다 약 9.7배 이상 영향력이 있는 것으로 나타났다. 이러한 회귀식은 설명력(R²)이 .859로 관리자에게 제약된 예산으로 정비능력의 확장과 예비품의 수량과 같은 식별된 제약조건들의 균형을 맞출 수 있는 시각을 제공할 수 있다. 또한 각 제약조건의 단위당 단가를 활용한다면 차후에 한계분석 등을 통한 최적의 예산배분이 가능해진다.

<표 4> 시뮬레이션 운용가용도의 다중회귀분석 결과

모형	비표준화계수		표준화계수	t	유의확률	공선성통계량	
	B	표준오차 오류	베타			공차	VIF
(상수)	-11.784	.621		-18.980	.000		
Capacity	11.839	.080	.922	147.715	.000	1.000	1.000
Spares	1.219	.080	.095	15.211	.000	1.000	1.000

R: .927, R² : .859, 수정된 R² : .859

$$Y(\text{운용가용도}) = -11.784 + 11.839X_1(\text{정비능력}) + 1.219X_2(\text{예비품 수량}) \quad (10)$$

V. 결론

본 연구는 정비능력과 구성품의 예비수량을 제약조건으로 하는 장비의 운용가용도에 관한 시뮬레이션 모델링 과정을 설명하였다. 특히 본 연구에서는 수요발생을 시계열 예측 방법이 아닌 신뢰성 공학기반의 고장률을 적용하였다. 장비의 구성품들은 장비 안에서 상호작용을 할 뿐 아니라 장비들 간에도 상호작용을 하여 구성품의 고장은 시스템 안에서 지속적으로 영향을 미친다. 전체의 장비들과 제약조건들은 마치 하나의 시스템처럼 반응하여 최종적으로 전체 장비의 운용가용도라는 결과를 만들어 낸다. 이러한 결과는 장비의 수리부속 각각에 대하여 시계열 분석을 통한 수요예측에는 한계가 있음을 보여주는 것이다. 장비의 운용가용도는 장비운영의 환경에 영향을 받게 되며, 장비운영 정도에 따라 고장이 빈도가 달라지고 이에 따라 수리부속의 수요가 영향을 받게 되는 것이다.

본 시뮬레이션에서는 동류전용(cannibalization), 구성품의 수명에 따른 폐기와 보충, 정비계단, 부품도해(WBS: work breakdown structure) 등을 다루지 않았지만 시뮬레이션에 이러한 요소를 추가하는 것이 크게 어려운 사항은 아니다. 보다 현실적인 시뮬레이션을 위해서라면 장비의 운용가용도 영향을 미치는 요소들을 식별하여 시뮬레이션에 포함하는 것이 좋다. 그러나 식별된 요소가 운용가용도에 미치는 정도가 미미하다면 제거할 수도 있다.

지금까지 본 연구에서 소개한 방법론은 고가의 장비를 운영하여 일정한 수준의 서비스를 제공하는 조직에서 일반화할 수 있다. 사용된 시뮬레이션에서는 경제적인 문제로 인한 정비능력의 수준이나 예비품 수량을 제약조건으로 식별하였지만, 정비를 외주로 하는 경우에는 외주정비업체의 정비능력 수준이나, 구성품의 복구시간(TAT: turn around time) 등으로 대체할 수도 있으며, 구성품의 예비수량이 아닌 예비장비 수량의 산정 등을 위해 사용할 수도 있다. 또한 장비의 구조를 직렬시스템이 아닌 병렬 또는 혼합시스템으로 변경하여 구성할 수도 있다. 조직이나 장비의 특성에 따라 시뮬레이션의 설정을 변경하여 실행한다면 역시 유효한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이러한 결과를 기본으로 다중회귀분석이나 한계분석 등 복합적인 추가분석이 가능하다.

【참고문헌】

- 강영식 · 백중배 · 이근오. (2002). <신뢰성공학>. 서울: 동화기술.
- 김도형 · 김종수. (1994). 비용과 최소 요구충족률을 고려한 다단계 수리가능제품의 적정여유부품 수준의 결정기법. 대한산업공학회. 추계학술대회: 310-323.
- 김도훈 · 문태훈 · 김동환. (1999). <시스템 다이내믹스>. 서울: 대영문화사.
- 김동환. (2004). <시스템 사고>. 서울: 선학사.
- 김원경. (2005). <신뢰도 공학의 이론과 실제>. 서울: 교우사.
- 김준홍 · 정 원. (2007). <신뢰성공학>. 파주: 청문각.
- 박영진 · 전건욱. (2008. 8). ARIMA를 이용한 항공기 수리부속 수요 예측. <한국국방경영분석학회지>, 제34권 2호: 79-101.
- 서순근 · 김호균 · 권혁무 · 차명수 · 윤원영 · 차지환. (2008). <신뢰성공학>. 서울: 교보문고.
- 서용성 · 정상환 · 박영택. (2000). 다단계 기계수리문제의 (S-1, S) 예비품 재고정책에 관한 연구. <한국품질관리학회지>, 제19권 1호: 129-140.
- 손희민 · 윤봉규. (2008. 12). 운용가용도를 고려한 최적 여유장비 수준 연구. <로지스틱스 연구>, 제16권 2호: 105-120.
- 이종협. (2007). <시계열분석과 응용>. 파주: 자유아카데미.
- 이춘섭 · 우제웅. (1999). <항공기 예비기관 / 모듈 적정 소요 산출공식 정립>. 서울: 한국국방연구원.
- 이치우 · 김선진 · 이성우 · 정상영. (2004). <신뢰성공학>. 인천: 원창출판사.
- 이학식 · 임지훈. (2009). <SPSS 16.0 매뉴얼>. 파주: 현문사.
- 임태진. (2005). <시스템 신뢰도 공학>. 숭실대학교 출판부.
- 장상철 · 유승근 · 이효정. (2008). <국방 M&S 종합발전계획 연구>. 서울: 한국국방연구원.
- 정용길. (2008). <종합군수지원(ILS) 이론과 실제>. 서울: 북코리아.
- 정일한 · 윤원영 · 김호균. (2009. 3). 가용도 제약하에 시뮬레이션과 메타휴리스틱을 이용한 MIME 시스템의 수리수준 및 수리부속 할당 동시 최적화. <경영과학>, 제26권 1호: 209-223.
- 최석철. (2008. 8). 성과기반군수(PBL)를 활용한 군수지원 발전방안 연구. <한국국방경영분석학회지>, 제34권 2호: 43-61.

- Aven, T. (1986). Reliability / Availability Evaluation of Coherent Systems based on Minimal Cut Sets. Reliability Engineering, Vol. 1: 93-104.
- Berenguer, C., Grall, A., Dieulle, L., and Roussignol, M., (2003). Maintenance Policy for a Continuously Monitored Deteriorating System. Probability in Engineering in Engineering and Informational Science, Vol. 17: 235-250.
- Berkowitz, Davis. (2004). Defining and Implementing Performance Based Logistics in Government. Defense Acquisition Review Journal, Vol. 12: 257-258.
- Blanchard, Benjamin S. (1992). Logistics Engineering and Management, 4th Edition. Pearson Education, Inc.
- Cachon, Gérard, and Terwiesch, Christian. (2006). Matching Supply with Demand: An Introduction to Operations Management. the McGraw-Hill Company.
- Forrester, J. W. (1961). Industrial Dynamics. MIT Press, Cambridge, MA.
- Kang, Keebom., Doerr, Kenneth H., and Sanchez, Susan M. (2006). A Design of Experiments Approach to Readiness Risk Analysis. Proceedings of the 2006 Winter simulation Conference: 1332-1339.
- Kelton, W. David, Sadowski, Randall P., and Strurrock, David T. (2007) Simulation with Arena, 4th Edition. the McGraw-Hill Company.
- Jones, James V. (2006). Integrated Logistics Support Handbook, 2nd Edition. the McGraw-Hill Company.
- Moon, Seong-Am., and Kim, Dong-Jin. (2005). System Thinking Ability for Supply Chain Management. Supply Chain Management; An International Journal, Vol. 10, No. 5.
- Steans III, D. E. (1998). Logistics Simulations Metamodel for F404-GE-400 Engine Maintenance. Naval Postgraduate School.
- Sterman, J. D. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. the McGraw-Hill Company.
- Wang, H. (2002). A Survey of Maintenance Policies Deteriorating System. European Journal of Operational Research. Vol. 139: 469-489.
- Ventana Systems. Inc. (2006). Vensim: Modeling Guide. Ventana Systems. Inc.