

다단계 공급체인에서의 장비운용가용도 시뮬레이션 분석

An Operational Availability Analysis in Supply Chain Using Simulation

박세훈* · 문성암**

Park, Se-Hoon* · Moon, Seong-Am**

Abstract

This study shows the operational availability(Ao) analysis of the supply chain with maintenance functions using the system dynamics simulation. The simulation uses 60 equipments which are serial systems composed by 4 major components. And every entities are connected each other by causal loops. So whole simulation executed like one organic system. Specially we consider 2 constraints, one is the number of spare parts and the other is maintenance capacity level. 2 constraints have 11 levels each so the simulation has 121(11 * 11) scenarios which scenario has 30 different random number seed. The simulation executed total 3,630(11 * 11 * 30) times.

We analysis average Ao of total equipments by 121 scenarios and additionally the regression of the average Ao and 2 constraints. As the result, we can get the more accurate values by the system dynamics simulation than the regression to analysis complex system like the supply chain with maintenance functions.

Keywords: 장비운용가용도, 정비능력, 수리부속, 공급체인관리, 시스템다이내믹스
(Operational Availability, Maintenance Capacity, Repair Part,
SCM, System Dynamics)

* 국방대학교 국방관리대학원 박사과정 (제1저자, fox6410@paran.com)

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

I. 서론

오늘날 항공, 철도, 선박, 군사 등의 분야에서 고가의 장비를 운영하는 조직은 각종 제약 조건 하에서 적정수준의 장비운용가용도(Ao: Operational Availability)를 유지하기 위하여 노력하고 있다(Blenchard, 1992; 손휘민 외, 2008). 그러나 현실적으로는 정비능력이나 예비품 수량 제약 등으로 인해 Ao를 희망하는 수준으로 유지하기 어렵다. 더구나 물가 상승이나 효율성을 제고를 위한 예산 압박으로 관리자들은 더욱 어려운 상황에 놓이게 되었다.

다수의 장비를 운영하는 조직은 보통 장비의 시스템 구조도 데이터를 가지고 있다. 이 데이터는 장비를 구성하는 다수의 구성품(component)과 그 구성품들을 구성하는 하위 구성품들의 계층구조와 각 구성품들의 공학적 특성에 대한 것이며, 이를 기준으로 볼 때 정비 수준을 몇 단계로 구분하여 시스템 구조도에서 상위에 있는 LRU(line repairable unit)들에 대한 간단한 장탈착 정비는 부대정비(organizational maintenance, o-level maintenance) 단계에서 수행한다. 구조도 상에서 하위의 구성품 또는 수리부속(repair part)들은 SRU(shop repairable unit)이라고 하며, 이들의 정비는 야전정비(intermediate maintenance, i-level maintenance) 단계나 창정비(depot maintenance, d-level maintenance) 단계에서 복구하여 최종적으로 부대정비에서 사용할 수 있도록 지원한다(Johns, 2006; Berenger et al., 2003).

각 단계의 정비를 위하여 각 단계에서는 물류창고를 가지고 있으며, 이곳에 정비지원에 필요한 구성품과 복구성 또는 소모성 수리부속을 확보하여 보관한다. 장비운명을 위한 공급체인의 기능은 단순히 자재의 확보, 지원기능 뿐만 아니라 정비기능이 융합되어 보다 복잡하다. 또한 정비기능은 정비사 수, 정비공간, 지원장비의 수량과 같은 정비능력 수준(maintenance capacity level)과 정비에 필요한 자재가 어느 정도 확보되어 있는지 등에 대하여 영향을 받는다(정일한 외, 2009; 서용성 외, 2000).

장비는 수많은 구성품과 수리부속으로 이루어져 있으며, 이들의 고장이 장비의 Ao에 영향을 준다. 한 개의 구성품이 고장이 나서 장비가 불가동 상태가 되면 다른 구성품들은 유희상태가 되기 때문에 장비가 복구되어 가동되기 전까지의 고장발생이 없다. 장비가 불가동 상태가 되면 수행해야 하는 전체 임무량을 완수하기 위하여 다른 장비들의 가동을 증가시키고 이로 인해 가동시간에 종속적인 고장빈도를 증가시킨다. 이렇게 장비의 구성품은 장비운영에 종속적이고, 상호 간에 영향을 주며 다단계 정비단계를 통해 복구되기 때문에 다단계 공급체인에서의 장비 Ao 분석은 매우 어렵다.

정비기능이 있는 공급체인에서 물류 흐름을 유발하는 장비의 고장은 고장 간 평균시간(MTBF, mean time between failure)과 같은 신뢰성공학(reliability engineering) 요소들에 의하여 구체적인 분석이 가능하다(Aven, 1986; 임태진, 2005; 서수근 외, 2008). 신뢰성공학은

정비비용, 효율성 및 통제개선을 통하여 Ao를 향상시키는 주요 도구이며, 수명주기비용(LCC: Life Cycle Cost), 로지스틱스 지원, 예비품 배분, 작업자 수준분석 등의 분야에서 중요한 기초자료를 제공할 수 있다(서순근 외, 2008). 따라서 신뢰성공학 기반으로 장비 Ao 분석 시뮬레이션 모델링을 한다면 더욱 구체적인 예측력을 보장할 수 있다.

시뮬레이션 방법론은 여러 제약조건에 대하여 시행착오 없이도 다양한 실험이 가능하기 때문에 경제적이다(Kelton et al., 2007). 특히 시스템 다이내믹스 시뮬레이션은 저장(stock)과 유량(rate) 변수를 이용하여 복잡한 시스템의 동적행태를 모델링하기에 적합하며, 변수간의 관계로 이루어진 루프에 대한 모델링을 통하여 시간의 선후관계에 따른 영향과정을 반영할 수 있다(Forrester, 1961; Sterman, 2000). 정재운 외(2010)은 이러한 시스템 다이내믹스 방법론에 시나리오 개발방법론을 접목하여 복합운송체계 시뮬레이션을 개발한 바 있다. 제약조건이 있는 다단계 공급체인에서 다수의 장비들이 서로 유기체처럼 인과관계를 형성하고 있기 때문에 제약조건하의 Ao 분석에 시스템 다이내믹스 시뮬레이션이 적합하다.

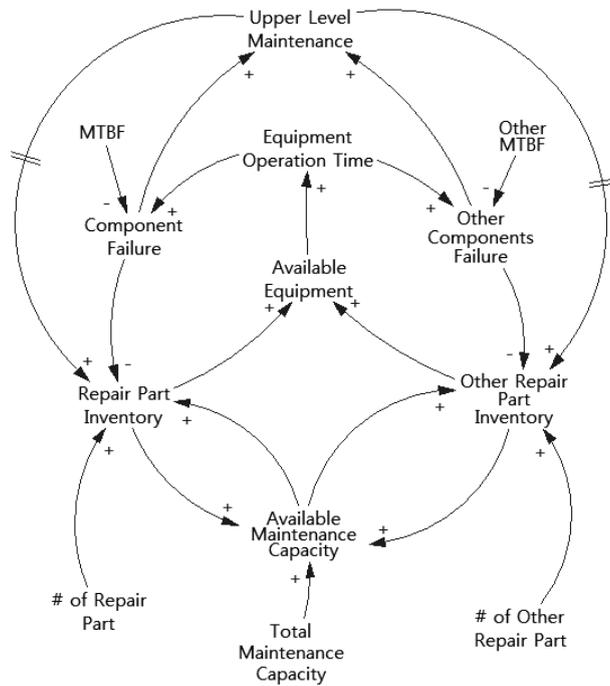
박세훈 외(2010)은 3개의 주요 구성품이 직렬로 연결된 20대의 장비에 대하여 정비능력과 수리부속의 예비품(spare parts) 수량의 제약조건 하에 단일단계의 정비 및 공급 시스템에 대하여 시스템 다이내믹스 방법론을 이용하여 장비의 Ao를 측정하였다. 그러나 실제로 장비를 운영하는 조직은 대부분 다단계 공급체인과 정비체계를 갖추고 있다. 따라서 단일단계의 정비 시스템에 대한 관찰은 하나의 구성품의 고장이 해당 장비의 Ao에 영향을 미칠 뿐 아니라 각 제약조건들에 영향을 미치고 이는 다른 구성품들의 고장에 영향을 주는 상호작용을 관찰하는데 도움이 된다. 그러나 다단계 공급체인에서는 상위 단계의 정비를 위하여 고장 구성품이 운송되는 과정에서 나타나는 시간 지연(delay)이 전체 시스템에 무시할 수 없는 영향을 미치게 한다. 이러한 다단계 공급체인 구조는 시스템의 복잡도를 증가시키고 시간 지연에 따른 원인과 결과의 관계를 직관적으로 인식하기가 힘들기 때문에 보다 체계적이고도 동적인 분석을 필요로 한다.

본 연구의 목적은 장비의 Ao를 일정수준 유지하기 위하여 필요한 단계별 정비능력과 예비품 수량의 적정수준을 예측하는 것이다. 이를 위하여 정비기능이 있는 다단계 공급체인 운영되는 다수의 구성품으로 이루어진 다수의 장비를 모델링하고, 정비능력과 예비품의 수량을 제약조건으로 반영하여 그 수준을 변경해 가면서 장비의 Ao를 동적으로 관찰하였다. 다단계 공급체인에서 제약조건을 반영한 Ao의 변화에 대한 시뮬레이션 연구는 고가의 장비를 운영하는 다양한 분야에서 제약조건에 대한 경제적인 한계점을 확인할 수 있는 시각을 제시한다.

II. 시뮬레이션 모델

1. 인과지도(CLD)

시뮬레이션은 장비가 가동됨에 따라 장비에 장착된 구성품의 가동시간이 증가되고, 구성품의 가동시간이 증가됨에 따라 MTBF에 의한 고장이 발생한다. 고장의 발생은 사용가능한 구성품의 재고를 감소시키며, 이를 수리하기 위하여 제한된 정비능력을 할당한다. 시스템의 인과지도는 [그림 1]과 같다.



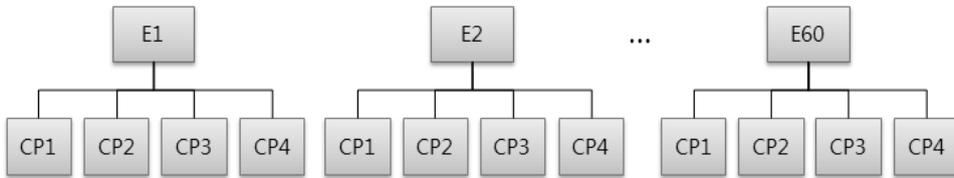
[그림 1] 제약조건하에서 구성품과 다른 구성품과 상호작용 인과지도

구성품에 고장이 발생하면 장비는 가동이 불가능하게 되며, 불가동 기간 중에는 다른 구성품의 고장은 발생하지 않게 된다. 고장 구성품을 복구하기 위해서 해당 단계의 제한된 정비능력 중 일부가 할당된다. 고장 구성품 중 일부는 상위 단계의 정비가 필요하며, 운송, 정비 및 복구되는 과정에서 지연이 발생한다. 각 단계에서 구성품의 고장은 동종 구성품의 가용도에 영향을 미치는 물론 정비능력 제약에 의하여 다른 고장 구성품들의 복구에 부정

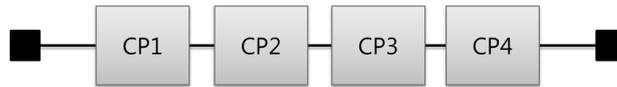
적 영향을 주며, 해당 장비 가동시간을 감소시켜 해당 장비의 다른 구성품의 고장을 감소시킨다. 해당 장비의 고장이 발생하더라도 전체 장비의 A_0 를 유지하기 위하여 다른 장비의 가동시간을 증가시켜 그 장비에 장착된 구성품들의 고장을 증가시킨다.

2. 연구설정

시뮬레이션 모델에서 장비는 모두 60대(E1, E2, E3, ..., E60)이고, 장비 구성도는 [그림 2]와 같다. 각 장비는 A_0 에 직접적인 영향을 미치는 구성품 4개(CP1, CP2, CP3, CP4)가 직렬로 이루어져 있으며, 장비의 신뢰성 블록도(RBD, reliability block diagram)은 [그림 3]과 같다. 한 대의 장비는 직렬 시스템이기 때문에 구성품 중 한 개라도 고장이 발생하면 해당 장비는 불가동 상태가 된다.



[그림 2] 모델의 장비 구성도



[그림 3] 장비의 신뢰성 블록도

시뮬레이션 기간은 전체 730일로 설정했으나 초기영향 제거를 위해 초기 365일의 관측치를 제거하고 후기 365일만 분석하였다. 장비 간 구성품 동류전용(cannibalization)은 하지 않는 것으로 가정하였다. 정비정책은 MTBF가 짧은 구성품을 먼저 복구한다. 장비별 정비 우선순위는 일련번호가 빠른 순으로 한다. 장비 고장률(λ , failure rate, $MTBF^{-1}$)의 대표적인 형태는 욱조곡선(bathtub curve)이다. 욱조곡선은 수명주기 초기에는 와이볼 분포로 표현되는 감소형(DFR, decreasing failure rate), 안정기에는 지수분포로 표현되는 유지형(CFR, constant failure rate), 말기에는 와이볼 분포로 표현되는 증가형(IFR, increasing failure rate)으로 구성된다. 본 연구에서는 구성품의 λ 는 안정기로 가정하여 CFR을 적용하며, 구성품의 MTBF는 지수분포를 사용하여 발생시킨다. 장비의 일일 최대 가동시간은 24시간이며, 매일

쉬지 않고 가동한다.

정비단계는 3단계로 적용한다. 부대정비는 고장난 구성품을 탈착하고 복구된 구성품을 장착하며, 정비능력의 제약은 없는 것으로 가정한다. 야전정비는 고장난 구성품의 주요 수리부속을 교체하여 복구하며, 정비능력의 제약이 있다. 창정비는 고장난 수리부속을 복구하며, 정비능력의 제약이 있다. 창정비 장소는 장비를 운영하는 부대정비나 야전정비 장소와 거리가 이격되어 있어 수리부속을 복구하기 위하여 일정 시간 동안 운송된다. 수리부속 복구를 위한 소모품은 무제한 공급이 가능한 것으로 가정한다. 주요변수의 구성은 <표 1>과 같다.

<표 1> 주요변수 구성

변수	값
장비 ID (Equipment ID)	E1, E2, E3, ..., E60
구성품 ID (Component ID)	CP1, CP2, CP3, CP4
장비당 일일운영시간 목표 (Daily Operation Time Objective per Equipment)	8 Hour/(개*day)
전체 장비의 일일 운영시간목표 (Daily Operation Time Objective)	480 hour/day
구성품별 MTBF	500, 1000, 1500, 2000 hour
정비능력 (Maintenance capacity)	0, 1, 2, ..., 10 dimensionless
예비품수 (Number of Spair Parts)	0, 1, 2, ..., 10 개
구성품 수리시간 (Component Maintenance Time)	1, 2, 3, 4 day
개당필요정비능력 (Maintenance Capacity Requirement per Component)	2, 4, 6, 8 dimensionless

연구 시나리오는 제약조건인 정비능력 수준과 예비품 수량에 대하여 각각 11개씩 설정하여 총 121개(11개 × 11개) 시나리오를 만들었고, 연구 시나리오 설정은 <표 2>와 같다. 정비능력 수준의 경우 정비능력이 없는 경우인 “0”부터 충분한 정비능력을 “10”으로 설정하고, 정비능력을 “0”에서 “10”까지 1씩 변화를 주어 전체 장비에 대한 Ao에 어떠한 영향을 주는지 관찰하고자 하였다. 예비품의 경우 4종류의 구성품 각각에 대하여 창고에 0개의 예비품이 있을 경우부터 각각 1개씩 증가시켜 10개의 예비품을 보유할 때까지의 경우에 대하여 전체 장비의 Ao를 관찰하고자 하였다. 이렇게 하여 구성한 121개의 시나리오에 대하여 난수 발생 seed를 달리하여 각각 30회씩 실시하여 시뮬레이션을 총 3,630회 실행하였다.

〈표 2〉 연구 시나리오 설정

제약조건	시나리오	시나리오 설정	제약조건 범위	시행횟수
정비능력 수준 (Maintenance Capacity)	11개	Pool로 구성된 정비능력의 구성품 전체에 대한 정비지원	0, 1, 2, ..., 10 dimensionless	각 조건별 30회
예비품 수량 (Number of Repair Part)	11개	각 구성품별로 예비품 수량을 11개 조건으로 설정	0, 1, 2, ..., 10 개	각 조건별 30회

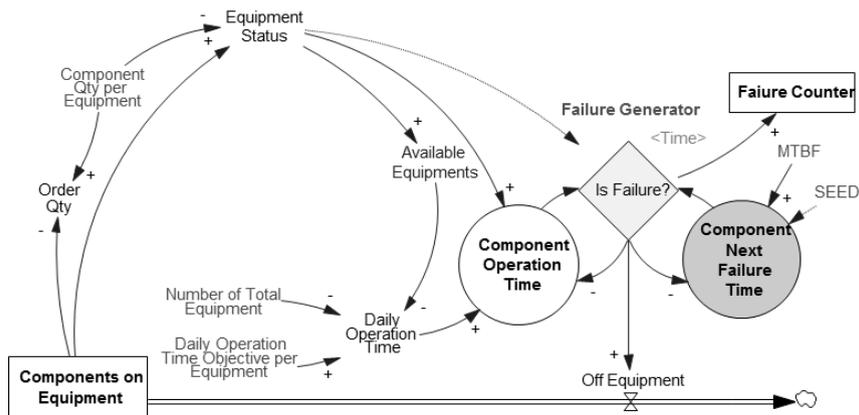
3. 고장발생

구성품의 고장발생을 묘사하기 위하여 사용되는 MTBF를 사용하는데, 수리 가능한 시스템에서 MTBF는 λ 의 역수이다. 신뢰도 함수를 시간 t 에 대한 함수로 나타내면 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 이고, 고장률 함수 $f(t) = 1 - R(t)$ 이므로 $f(t)$ 를 MTBF에 대하여 정리하면 식(1)과 같은 지수함수로 나타낼 수 있다. 여기에서 식 (1)을 t 에 대하여 정리하면 식 (2)와 같으며, $f(t)$ 에 임의의 난수를 대입하여 구할 수 있는 시간 t 는 시뮬레이션에서 차기 고장시간(Next Failure Time)이다.

$$f(t) = 1 - e^{-\frac{t}{MTBF}} \tag{1}$$

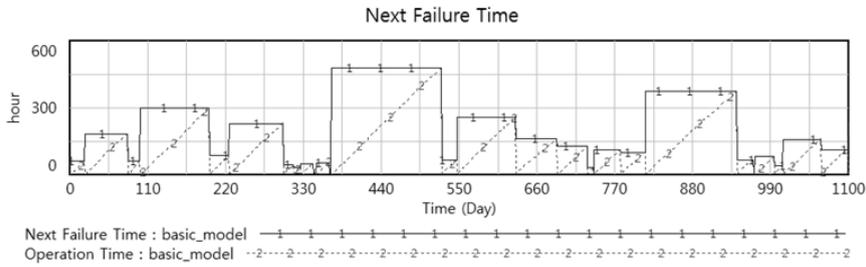
$$t = -MTBF \times \ln(1 - f(t)) \tag{2}$$

고장발생 모듈은 [그림 4]와 같다. 고장판단(Is Failure?)은 기본적으로 고장이 없음을 의미하는 “0”이지만, 구성품 가동시간(Operation Time)이 차기 고장시간과 같아지는 시점에서 고장상태를 의미하는 “1”로 바뀐다. 고장이 발생되면 구성품을 장비에서 탈착하며, 장비상



[그림 4] 고장발생 모듈

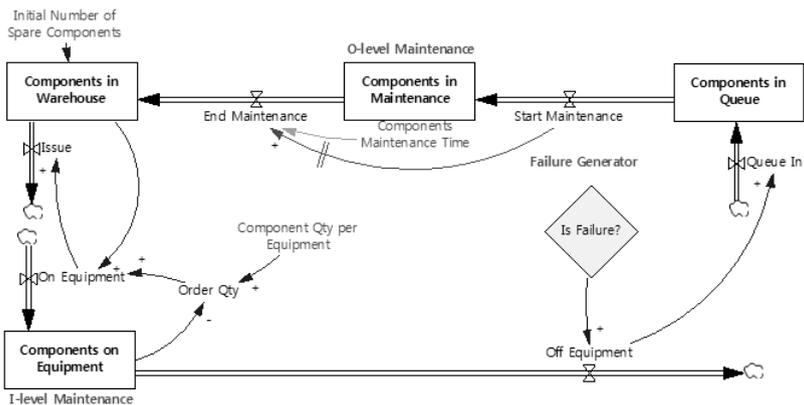
태(Equipment Status)는 가동상태인 “1”에서 불가동 상태인 “0”으로 변경된다. 이렇게 발생된 차기고장시간의 형태는 지속적으로 고장수리가 될 경우 [그림 5]와 같다. 구성품의 가동시간은 장비상태가 가동일 때만 유효하다(박세훈 외, 2010).



[그림 5] 단일 구성품의 차기고장시간 발생 형태(MTBF = 100)

4. 구성품의 상태전이

고장발생으로 부대정비 단계에서 장비에서 탈착된 구성품은 야전정비를 받기 위하여 정비대기(Components in Queue)한다. 정비대기 중인 구성품은 정비능력의 여유와 우선순위에 따라 야전정비 수준에서 수리시작(Start Maintenance)되어 정비상태(Components in Maintenance)로 전이된다. 정비중인 구성품은 구성품별 수리시간(Components Maintenance Time)이 지나면 정비종료(End Maintenance)되고 창고에 입고(Components in Warehouse)된다. 구성품의 고장으로 불가동 상태의 장비가 있다면 창고에 해당 구성품의 예비 재고가 있을 경우 창고에서 출고되어 해당 장비에 장착되어 장비는 가동상태로 변경된다. 부대정비와 야전정비 수준에서 구성품의 상태전이는 [그림 6]과 같이 발생한다.

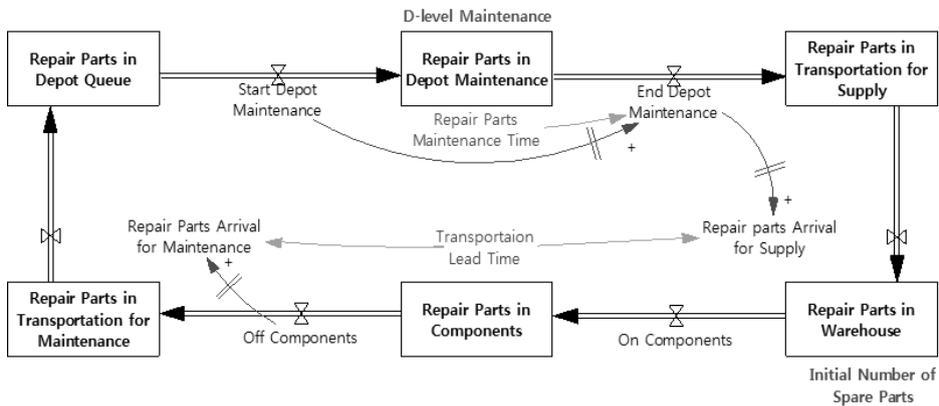


[그림 6] 부대정비와 야전정비 수준에서의 구성품 상태전이 모듈

고장난 구성품 중 일부는 야전정비 수준에서 수리가 불가능하며, 일정한 비율만큼 창정비가 필요한데, 이 때 구성품에서 탈착된 하위 수리부속은 창정비를 위해 운송 리드타임 (Transportation Lead Time) 동안 운송되고 창정비가 종료된 후 다시 운송되어 오기 때문에 지연이 발생된다. 창정비 수준에서의 구성품에서 탈착된 수리부속의 상태전이 모듈은 야전정비 수준에서와 유사하며 [그림 7]과 같이 발생한다. 창정비가 필요한 구성품의 수리부속은 창정비를 받기 위하여 창정비대기(Repair Parts in Depot Queue)한다. 창정비대기 중인 수리부속은 창정비 능력의 여유와 우선순위에 따라 창정비 수준에서 창수리 시작(Start Depot Maintenance)되어 창정비상태(Repair Parts in Depot Maintenance)로 진이된다. 창정비 중인 수리부속은 수리부속별 수리시간(Repair Parts Maintenance Time)이 지나면 창정비 종료(End Depot Maintenance)되고 창고에 입고(Repair Parts in Warehouse)된다. 수리부속의 고장으로 불가동 상태의 구성품이 있다면 창고에 해당 수리부속의 예비 재고가 있을 경우 창고에서 출고되어 해당 구성품의 수리에 사용되고 구성품은 가동상태로 변경된다.

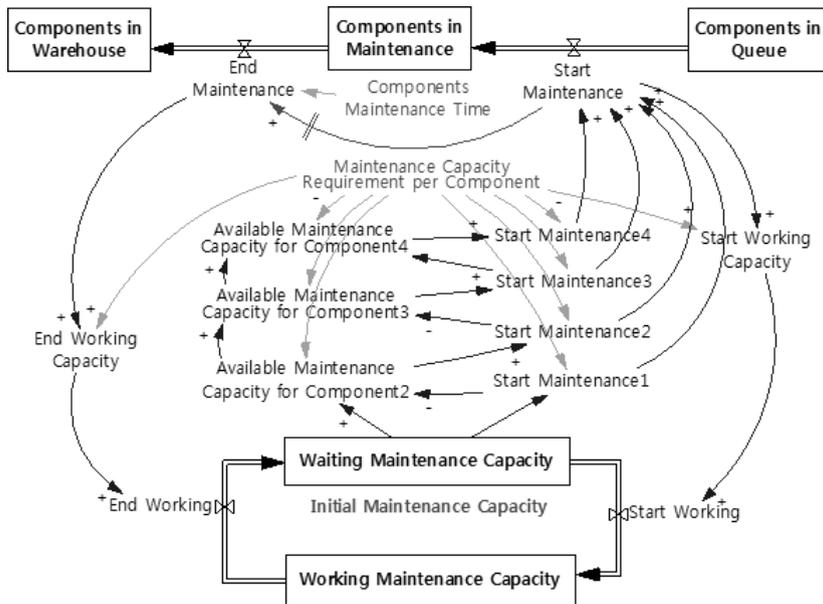
5. 정비능력의 제약

부대정비는 무제한으로 설정하였지만, 부대정비와 창정비 수준의 정비능력은 “0”에서 “10”까지로 설정하였다. 정비능력의 수준이 “0”이면 고장이 발생된 구성품에 대하여 수리가 불가능하기 때문에, 구성품의 예비재고와 초기에 장착된 구성품이 모두 고장나게 되면 A₀는 “0”이 된다. 정비능력의 수준이 “10”이면 정비능력이 충분한 수준이므로 특별히 고장이 특정한 시기에 몰리지 않는 한 구성품의 정비 지원에 문제가 없다.



[그림 7] 창정비 수준에서의 구성품 상태전이 모듈

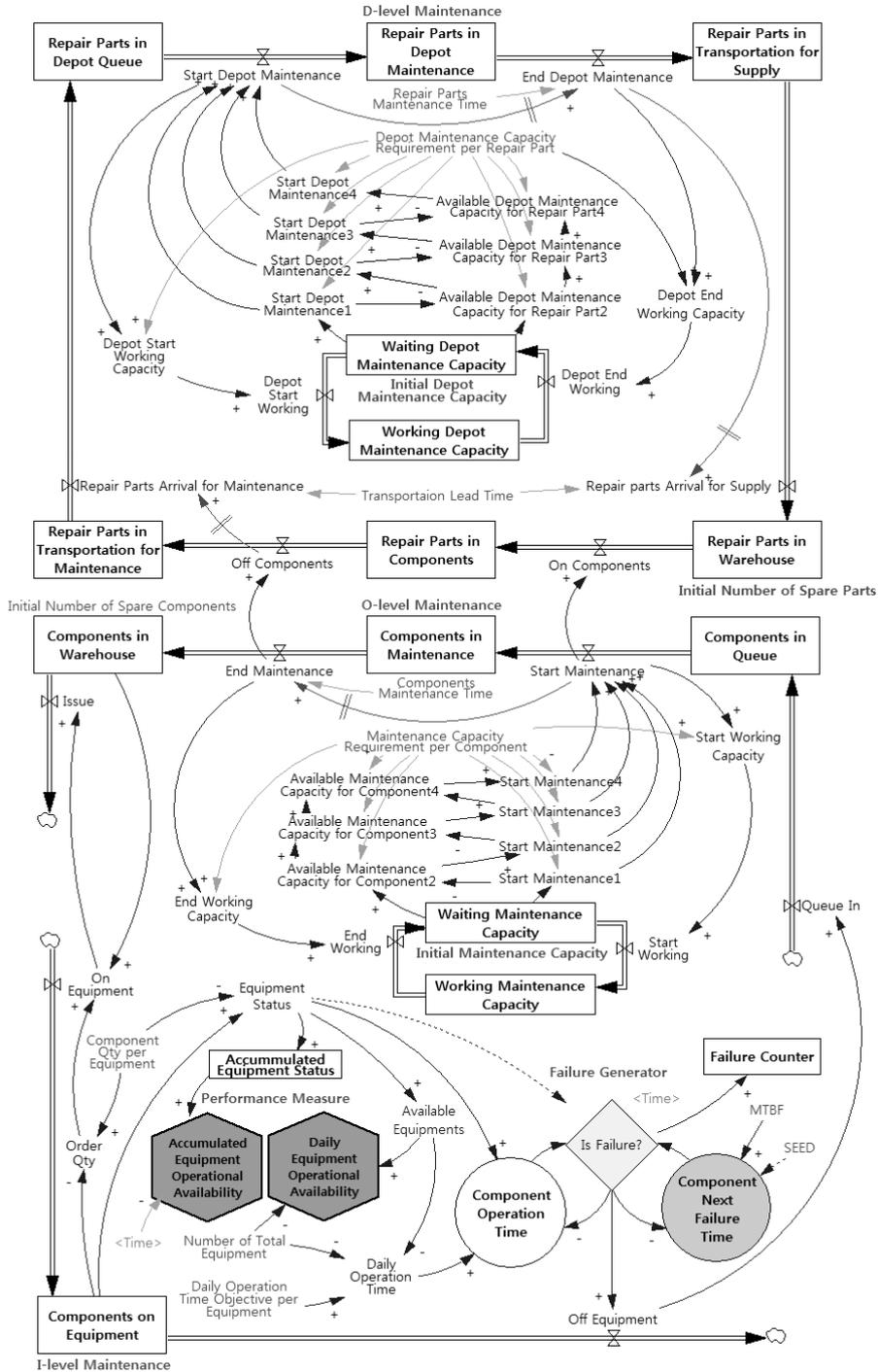
구성품의 고장발생이 야전 정비능력의 범위 내에서 발생하면 문제가 없지만, 정비능력의 범위를 벗어난 고장은 정비능력의 여유가 생길 때까지 복구될 수 없다. 야전정비에서의 정비능력 제약 모듈은 [그림 8]과 같고, 창정비에서의 정비능력 제약 모듈도 야전정비능력 제약모듈과 유사하다. 각 단계의 정비가 시작되기 위해서는 정비에 필요한 수리부속을 창고에 보유하고 있어야 하고, 해당 정비에 필요한 최소한의 창정비능력이 대기상태에 있어야 한다. 정비대기 중인 구성품 및 수리부속의 정비 우선순위는 MTBF가 작은 순서이다.



[그림 8] 야전정비에서의 정비능력 제약 모듈

6. 시뮬레이션 모델 흐름도(SFD)

수리기능이 있는 다단계 공급체인에 대한 정량적 모델의 흐름도는 [그림 9]와 같다. [그림 9]의 상부에 묘사되어 있는 창정비와 하부에 묘사되어 있는 야전정비의 모듈은 구조가 유사하지만 시간지연을 갖는 운송으로 연결되어 있다. 야전정비의 수요는 장비의 구성품의 고장발생에 따라 장비에서 탈착된 구성품의 수량과 각 구성품 당 정비시간에 의해서 결정되며, 야전정비의 정비능력 범위 내에서 정비가 지원된다. 고장난 구성품 중 일부는 창정비가 필요하며, 이 구성품의 수리부속이 창정비를 위하여 운송되고 창정비 후 야전정비를 위하여 다시 돌아온다.

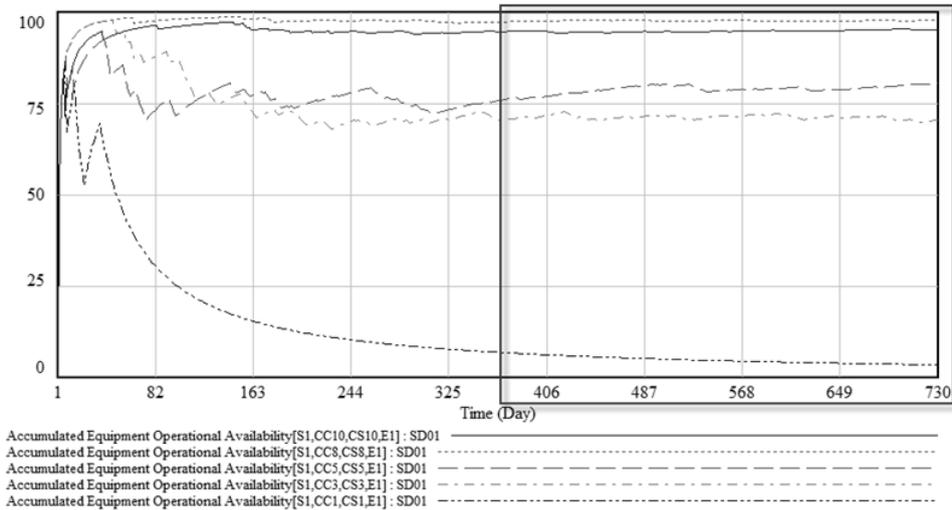


[그림 9] 다단계 공급체인에서의 A0 분석 모델 흐름도

Ⅲ. 시뮬레이션 결과분석

전체 장비의 Ao에 영향을 주는 제약조건인 정비능력(0, 1, 2, ..., 10)과 구성품의 예비품 수량(0, 1, 2, ..., 10개) 별로 생성한 121개 시나리오별로 장비의 Ao가 어떻게 유지되는지 확인하기 위하여 각각 난수 seed를 달리하여 30회씩 총 3,630회의 시뮬레이션을 실행하였다. 관찰기간은 365일(초기영향 제거를 위해 초기 365일은 제거)이었다.

각 제약조건에 의하여 발생된 결과에서 시간의 변화에 따른 장비의 누적 Ao의 예는 [그림 10]과 같다. 시뮬레이션에서는 하나의 시나리오 당 장비가 60대(E1, E2, E3, ..., E60)가 묘사되었는데, [그림 10]은 난수 seed가 1인 경우 장비 E1의 누적 Ao의 예이다. 정비능력 수준이 “10”, 예비품의 수량이 10개인 경우 장비 E1의 누적 Ao가 96% 이상으로 매우 높게 유지되고 있지만, 제약조건들이 열악해질수록 Ao의 수준은 떨어진다. 정비능력 수준이 “1”이고 예비품 수량이 1개인 경우는 시간이 지나갈수록 Ao가 5% 아래로 떨어진다.

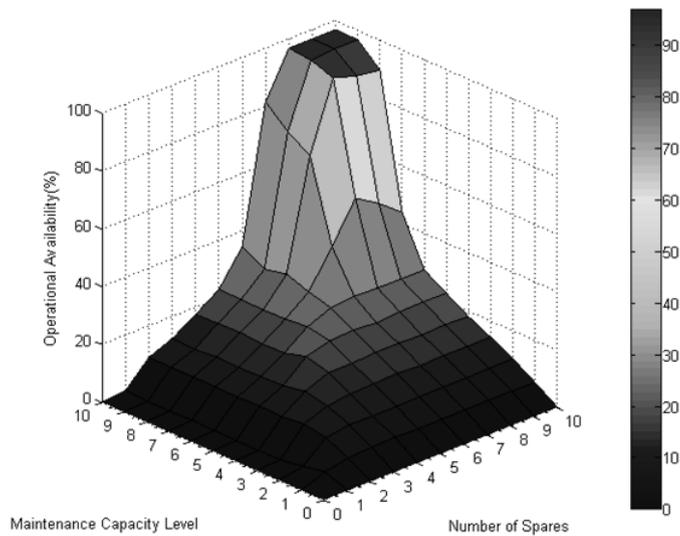


[그림 10] 각 장비별 누적 Ao의 예

<표 3>은 시뮬레이션 결과 이러한 각각의 장비의 Ao에 대하여 평균을 내고 시나리오별로 정리한 것으로 모두 121개의 Ao 평균을 구하였다. Ao 평균을 [그림 11]과 같은 surface graph로 보면 제약조건에 따라 Ao 평균이 어떻게 영향을 받는지 쉽게 알 수 있다.

〈표 3〉 정비능력과 예비품 수량 시나리오별 시뮬레이션 결과 A0 평균(%)

예비품 수량 (개)	정비능력 수준(dimensionless)											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	Mean	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Std.dev.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	Mean	-	2.96	4.58	5.09	5.35	5.09	5.12	5.11	5.33	5.25	5.08
	Std.dev.	-	0.32	0.52	0.52	0.51	0.61	0.40	0.44	0.47	0.60	0.48
2	Mean	-	1.47	8.20	9.51	9.27	9.35	9.52	9.65	9.61	9.77	9.92
	Std.dev.	-	0.94	0.50	0.76	0.76	0.90	0.65	0.96	0.84	0.95	0.88
3	Mean	-	0.43	9.59	12.63	13.57	13.93	14.29	13.75	14.10	13.95	13.97
	Std.dev.	-	0.52	1.01	0.62	1.23	1.18	0.93	1.38	1.20	1.06	1.09
4	Mean	-	0.13	8.79	14.27	17.61	17.52	18.07	18.06	17.74	18.15	17.70
	Std.dev.	-	0.25	0.85	1.21	1.07	1.46	1.55	1.54	1.47	1.12	1.60
5	Mean	-	0.25	9.00	12.87	19.72	21.99	22.44	21.77	22.39	22.58	22.38
	Std.dev.	-	0.45	0.92	1.11	1.20	0.97	1.33	1.72	1.22	1.96	1.53
6	Mean	-	0.36	8.71	12.59	17.57	23.46	26.80	27.57	27.24	27.11	27.09
	Std.dev.	-	0.47	1.27	1.07	1.28	1.26	1.23	2.29	1.85	1.65	1.81
7	Mean	-	0.58	8.90	12.34	17.38	22.77	28.94	41.40	54.92	49.92	43.63
	Std.dev.	-	0.78	0.93	0.93	1.41	0.99	2.69	11.50	17.26	16.45	13.68
8	Mean	-	0.24	8.94	12.63	17.95	22.50	31.70	69.46	93.19	90.68	89.44
	Std.dev.	-	0.39	0.87	1.06	1.14	1.54	5.70	16.44	6.04	8.03	9.25
9	Mean	-	0.29	8.87	11.95	17.68	22.75	30.04	74.45	95.90	96.70	96.58
	Std.dev.	-	0.36	0.92	1.25	1.56	1.28	2.62	15.30	1.15	0.13	0.37
10	Mean	-	0.67	8.95	12.28	17.39	22.90	34.46	81.32	96.72	96.72	96.72
	Std.dev.	-	0.84	0.98	1.10	1.14	1.03	7.50	16.05	0.25	0.10	0.10



[그림 11] 제약조건별 A0 평균에 대한 surface graph

각 정비능력 수준과 구성품의 예비품 수량 제약조건이 A_0 에 미치는 영향을 평가하기 위하여 이원분산분석을 실행한 결과, 두 제약조건 모두 A_0 평균의 차이를 발생시켰다. 정비능력의 수준은 $F\text{-value} = 4,555.439$, $p\text{-value} = 0.000$, 예비품 수량은 $F\text{-value} = 4,542.003$, $p\text{-value} = 0.000$, 상호작용 $F\text{-value} = 520.402$, $p\text{-value} = 0.000$, $R\text{ Square} = 0.976$, Adjusted $R\text{ Square} = 0.975$ 이었다. 따라서 희망하는 수준의 A_0 를 유지하기 위하여 정비능력 수준이나 구성품의 예비품 수량을 조절하는 것은 의미가 있다.

시뮬레이션 결과 정비능력 수준이 “0”이거나 예비품의 수량이 0개인 경우 A_0 평균은 0%가 되어 희망하는 서비스 수준을 유지할 수 없다. 이 시뮬레이션에서 만약 A_0 를 60% 이상으로 유지하고 싶다면 정비능력 수준은 “7” 이상으로, 구성품의 예비수량은 각각 8개 이상을 구매하면 된다. 만약 정비능력 수준을 “8” 이상으로 올린다면 A_0 를 95% 이상의 수준을 유지할 수 있다. 그러나 정비능력 수준을 “9” 이상으로 올리거나 구성품의 예비품을 추가로 구매하는 것이 A_0 를 향상시키는데 큰 도움이 되지 못한다는 점을 알 수 있다. 만약 정비능력 수준을 “1” 만큼 향상시키는 데 필요한 단위비용이나 구성품의 단가 등을 고려한다면 적정 수준의 A_0 를 유지하기 위하여 어떤 조치를 취하는 것이 더 경제적인지에 대한 분석도 가능할 것이다.

시뮬레이션 결과에서 A_0 평균을 종속변수로 하고 제약조건인 정비능력과 예비품 수량을 독립변수로 하여 회귀분석을 실시한 결과는 <표 4>와 같다. 분석결과 1차 선형 회귀식은 $R = 0.766$, $R\text{ Square} = 0.587$, Adjusted $R\text{ Square} = 0.587$ 로 충분한 설명력을 보여주지 못하고 있다. 이런 회귀분석의 경우 A_0 평균에 대한 정비능력의 수준과 예비품의 수량의 설명력은 58.7%에 그치지만, 시뮬레이션 분석은 두 가지의 제약조건이외에 시스템 속에서 영향을 주는 다양한 변수들의 상호작용들을 계산하여 A_0 의 수준을 비교적 상세하게 산정할 수 있다. 그 결과 [그림 11]에서 정비능력 수준이나 예비품 수량의 관점에서 볼 때 독립변수인 두 가지 제약조건에 따른 A_0 의 결과는 “S”자 형태의 비선형성을 보인다. 시스템의 복잡도가 증가함에 따라 독립변수인 두 가지 제약조건에 따라 나타난 종속변수 A_0 평균은 비

<표 4> 전체 A_0 평균에 대한 제약조건 회귀분석 결과

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
(Constant)	-24.698	0.682		-36.226	0.000		
정비능력 수준	4.483	0.088	0.544	50.937	0.000	1.000	1.000
예비품 수량	4.453	0.088	0.540	50.597	0.000	1.000	1.000

$R = 0.766$, $R\text{ Square} = 0.587$, Adjusted $R\text{ Square} = 0.587$

선형적인 모습을 보이기 때문이다. 따라서 복잡한 시스템을 분석할 경우에는 회귀분석보다는 시뮬레이션을 통한 분석의 설명력이 높다.

IV. 결론

최근 시장상황은 물가상승으로 인해 원가가 증가되고 있는 반면 고객의 서비스 품질에 대한 니즈가 증가되고 있다. 특히 항공기와 같은 고가의 장비를 이용하여 서비스를 제공하는 조직들은 경제적 압력을 극복하면서도 적정 서비스 수준을 유지하여야 하는 어려움이 있다. 이러한 조직들이 시행착오를 통한 비용소모 없이 다양한 제약조건 하에서의 Ao를 예측해 볼 수 있는 방법론 중에 유용한 것이 시뮬레이션이다.

특히 이번 시뮬레이션은 시스템 다이내믹스의 개념을 도입하여 각 구성품의 가동시간을 계산하여 고장을 발생시키고 한 대의 장비 내에서 각 구성품들 간의 인과관계를 구축하였을 뿐 아니라, 다단계 공급체인에서의 정비 단계별 정비능력의 제약을 묘사함으로써 한 개의 큰 조직에 속해 있는 각 장비들 간의 인과관계도 묘사하였다. 또한 모델에서 신뢰성공학을 이용하여 장비고장 발생의 현실성을 증가시켰다. 수리기능이 있는 다단계 공급체인에서의 장비들을 모델로 구성한 다음 예산에 의하여 제약을 받을 수 있는 두 가지 요소인 정비능력 수준(0, 1, 2, ..., 10)과 구성품의 예비품 수량(0, 1, 2, ..., 10개)을 제약조건으로 하여 121개(11개 * 11개)의 시나리오를 작성하고 각각의 시나리오에 대하여 장비의 Ao가 어떻게 변화하는지 관찰하였다.

그 결과 시뮬레이션을 통하여 정비능력 수준과 예비품의 수량의 구비 정도가 Ao에 미치는 영향을 확인할 수 있었을 뿐 아니라, 희망하는 Ao를 유지하기 위해서는 정비능력 수준과 예비품의 재고를 어느 정도로 확보해야 하는지에 대하여 알 수 있었다. 또한 이러한 절차를 통하여 구성품 고장 복구를 통하여 장비의 Ao를 분석할 수 있는 시스템 다이내믹스 시뮬레이션 모델을 일반화하였다. 시뮬레이션 모델은 각 장비의 구성품 상호간의 영향관계뿐만 아니라 한 조직에 속해 있는 모든 장비들 간의 상호작용을 묘사하였는데, 그 결과 복잡한 시스템 속에서 발생하는 비선형적인 관계에 대하여 선형회귀 분석 결과보다 설명력이 높았다.

추후 이번 모델에서 생략된 장비 간의 동류전용 허용, 각 단계별 구성품 및 수리부속에 대한 조달, 다수의 하위 제대(echelon) 구성이나 다단계 시스템 구조도를 반영하는 등의 개선이 이루어진다면 보다 현실적인 예측이 가능할 것이다. 또한 실제 장비의 운용 데이터를 이용한 시뮬레이션을 하여 모델을 검증하는 것도 필요하다.

【참고문헌】

- 박세훈 · 문성암 · 이정환. (2010). “정비능력, 예비품 수량 제약조건 하에서의 운용가용도 시뮬레이션 연구”. 『한국 시스템다이내믹스 연구』 제11권 제2호: 119-138.
- 서순근 · 김호균 · 권혁무 · 차명수 · 윤원영 · 차지환. (2008). 『신뢰성공학』. 교보문고.
- 서용성 · 정상환 · 박영택. (2000). “다단계 기계수리문제의 (S-1, S) 예비품 재고정책에 관한 연구”. 『한국품질관리학회지』 제19권 제1호: 129-140.
- 손휘민 · 윤봉규. (2008). “운용가용도를 고려한 최적 여유장비 수준 연구”. 『로지스틱스 연구』 제16권 제2호: 105-120.
- 임태진. (2005). 『시스템 신뢰도 공학』. 숭실대학교 출판부.
- 정일한 · 윤원영 · 김호균. (2009). “가용도 제약하에 시뮬레이션과 메타휴리스틱을 이용한 MIME 시스템의 수리수준 및 수리부속 할당 동시 최적화”. 『경영과학』. 제26권 제1호: 209-223.
- 정재운 · 김현수 · 최형림 · 홍순구. (2010). “지속가능 물류를 위한 TP-SD 방법론 기반의 복합 운송체계 시뮬레이션 모델 개발”. 『한국 시스템다이내믹스 연구』 제11권 제2호: 45-75.
- 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.
- Blanchard, Benjamin S. (1992). *Logistics Engineering and Management*, 4th Edition, Pearson Education, Inc.
- 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.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. the McGraw-Hill Company.