

흡수 마코프 체인을 활용한 적정 M/F 재고 수준에 관한 연구

(An Analysis on the Optimal Level of the Maintenance Float Using Absorbing Markov Chain)

김 용(Kim Yong)*, 윤봉규(Yoon Bong-Kyoo)**

초 록

군은 신뢰도(Reliability)나 가용도(Availability)가 다른 어떤 조직보다 중요한 조직이다. 최근에는 시스템 준비태세(System Readiness)를 강조하며, 무기체계의 성능뿐 아니라 가용도를 중요한 성과 목표로 정의하고 있어 이런 경향은 심화되고 있다. 이런 맥락에서, 군의 중요한 설비나 장비들은 신뢰도(Reliability)와 가용도(Availability) 재고를 위해 만약의 경우를 대비하는 여유 장비를 운용하고 있다. 이를 정비대충장비(M/F, Maintenance Float, 이하 M/F) 라고 한다. 군의 정비대충장비는 매년 장비의 수량과 가동률을 적용하여 소요량을 산출하고 있으나, 기존의 방법은 고장특성과 정비부대의 정비능력에 대한 고려가 미흡하여, M/F 도입에 따른 효과인 신뢰도와 가용성 재고를 원래 의도된 목표만큼 달성하지 못하고 있다. 본 연구에서는 대기행렬이론과 흡수 마코프체인을 활용하여, M/F 재고 수준 결정을 위한 분석 모형을 제시하고, 그 결과를 활용하여 역습부대역할을 수행하는 OO부대에서 운용되고 있는 K-1전차의 운영유지 대충장비의 최적 수량을 산출했다. 본 연구는 기존 연구에 비해 이해가 용이한 (Tractable) 방법론을 활용하면서도 M/F 수준과 관련된 의사결정을 정교하게 묘사할 수 있는 모형을 제시했다는 점에서 의의가 있다.

Abstract

The military is an organization where reliability and availability take much more importance than in any other organization. And, in line with a recent trend of putting emphasis on 'system readiness', not only functions but also availability of a weapon system has become one of achievement targets. In this regard, the military keeps spares for important facility and equipment, which is called as Maintenance Float (M/F), in order to enhance reliability and availability in case of an unforeseen event. The military has calculated yearly M/F requirements based on the number of equipment and utilization rate. However, this method of calculation has failed to meet the intended targets of reliability and availability due to lack of consideration on the characteristics of equipment malfunctions and maintenance unit's capability. In this research, we present an analysis model that can be used to determine an optimal M/F inventory level based on queuing and absorbed Markov chain theories. And, we applied the new analysis model to come out with an optimal volume of K-1 tank M/F for the OO division, which serves as counterattack military unit. In our view, this research is valuable because, while using more tractable methodology compared to previous research, we present a new analysis model that can describe decision making process on M/F level more satisfactorily.

KeyWords: Maintenance Float (M/F), Quasi Birth Death Process, Queueing, Absorbing Markov Chain

* 육군 대위, 육군 종합군수학교 교관

** 국방대학교 운영분석과 조교수

1. 서론

기업의 환경 변화 추세 중 주요한 특징의 하나는 소비자 기호의 다양화와 인터넷 발달로 인한 제품 정보의 증가 등으로 인해 수요자들이 상품이나 서비스 지연에 대한 허용 대기시간(Tolerance) 수준이 매우 짧아지고 있다는 것이다. 이 문제에 대처하기 위해서 기업은 문제 발생시 즉각적으로 대처하기 위하여 여유 설비나 여유 인력을 보유하고 있다. 그러나, 여유 설비나 인력은 비용의 증가를 수반하므로, 상품이나 서비스 제공 시간의 지연을 방지함으로써 발생하는 이익을 고려하여 여유 설비/인력의 수준을 결정하는 것이 필요하다.

한편, 군에서는 최근 시스템 준비태세(System Readiness)를 강조하고 무기체계의 성능이 아닌 가용도(Availability)를 강조하는 성과관리군수제도(Performance Based Logistics)에 대한 관심이 높아지고 있다 [1]. 이는 현장 수요에 적시 대응하는 것을 강조한다는 점에서 준비태세(Readiness) 향상을 위해 적정 여유 장비를 보유하는 것의 중요성이 높아지는 것을 의미한다. 이런 맥락에서, 군은 중요한 설비나 장비들의 신뢰도(Reliability)와 가용성(Availability)을 확보하기 위해 만약의 경우를 대비하는 여유 장비를 운용하고 있다. 이를 정비대충장비(M/F, Maintenance Float, 이하 M/F)라고 하며, 신뢰도나 가용성이 어떤 기업조직보다 중요시되는 군의 경우에는 주요 장비에 반드시 M/F를 확보하여 활용하도록 규정되어 있다 [2]. 고장이 발생하지 않는다면 불필요한 M/F는 구매나 투자 의사결정 시 비용/편익 분석을 통해 적정 수준을 결정하는 것이 매우 중요하다. 현재 국방분야에서도 효율성과 원가절감을 강조하는 경향이 강화되고 있다는 점도 적정 M/F 수준에 대한 의사결정의 중요성을 높이는 요인이다.

현재 우리 군은 정비부대에 입고률이 높은 주요 장비 및 장비 구성품에 대하여 입고 정비기간의 공백을 정비대충장비로 지원함으로써 전투력

공백을 방지하고 있다. 군의 정비대충장비는 매년 장비의 수량과 가동률을 적용하여 소요량을 산출하고 있으나, 이러한 방법은 대상 장비의 고장특성과 정비부대의 정비능력이 고려되지 않은 방법으로 정비대충장비의 소요량이 과소, 과다 책정되어 M/F 도입에 따른 효과인 신뢰도와 가용성 제고를 원래 의도된 목표만큼 달성하지 못하고 있다.

본 연구에서는 이를 해결하기 위해 대기이론(Queueing Theory)를 활용하여 최적 M/F 결정 문제를 분석하고자 한다. 또한, 역습부대역할을 수행하는 육군의 ○○부대에서 운용되고 있는 K-1전차 고장자료를 분석하여 고장률을 구하고 야전정비부대의 정비능력을 고려하여 현재 ○○부대 정비대에서 장비운용 가용도를 유지하기 위해 보유하고 있어야 할 K-1전차의 운영유지 대충장비의 최적 수량을 산출하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 2장에서 M/F의 운용개념 및 기존 연구를 살펴보고, 3장에서는 M/F 수리를 위한 분석 모형을 제시하고, 4장에서는 이를 실제 문제에 적용하여 K-1 전차의 적정 M/F 수준을 제시한다.

2. 육군 M/F 운용현황 및 기존연구

2.1 육군 M/F의 개념

정비대충장비는 정비기간동안 전투 장비를 장기간 운용치 못함으로써 임무수행에 지장을 초래하는 것을 방지하기 위해 정비지원시설에 저장하도록 지정된 완성장비 또는 장비 구성품을 말한다. 정비대충장비의 운용목적은 정비부대에 입고율이 높은 주요 전투 장비의 전투력 공백방지 및 장비 가동률 향상을 통해 즉각적인 준비태세를 유지하는데 있다. 특히, 최근에는 장비의 신뢰도(Reliability)보다 장비의 필요시 준비태세(Readiness at War)를 중시하는 성과중심군수(Performance Based Logistics, PBL)의 개념이

확산됨에 따라 정비대충장비의 중요성은 더욱 강조되고 있다 [2,9].

정비대충장비는 운영유지대충장비(Operation Readiness Float: ORF) 와 순환정비대충장비(Repair Cycle Float : RCF)로 구분된다. 운영유지대충장비(ORF)는 직접지원정비부대에서 운용되는 것으로 정비체류 기간 내 수리반환 불가시 고장장비와 1:1로 교환되며 대충장비와 1:1 교체된 입고장비는 정비 후 다시 운영유지대충장비로 충당되는 장비 및 장비 구성품을 말한다. ORF 수는 현재 다음과 같이 결정된다.

$$ORF \text{ 수준} = \text{운영장비인가량} \times \frac{\text{불가동률}}{\text{가동률}} \quad (1)$$

$$= \text{운영장비인가량} \times \frac{\text{불가동시간}}{\text{가동시간}}$$

식 (1) 우변의 가동시간을 좌변으로 옮기면, 우변은 총 불가동 시간 (운영장비인가량*불가동시간)이 되고 좌변은 ORF로 제공 가능한 여유시간이 되어 이를 일치시키는 수준에서 ORF의 수량이 결정되는 것을 나타내고 있다.

순환정비대충장비(RCF)는 일반지원 정비 및 기지 정비 시설부대에서 운용되며 야전 및 기지 순환 정비기간에 전투력 공백을 방지하기 위하여 운용되는 장비 및 장비 구성품으로써, 순환 정비기간 중 운용장비와 1:1 교환하고, 교체된 입고장비는 정비 후 순환 정비 대충장비로 확보 운용된다.

$$RCF \text{ 수준} = \text{운영장비인가량} \times \frac{\text{평균정비기간}}{\text{평균순환주기}} \quad (2)$$

식 (2) 또한, 식 (1)과 유사한 방식으로 해석할 수 있다. 평균순환주기를 양변에 곱하면, 우변은 정비로 인한 운영장비 불가동 시간이 되며, 좌변은 M/F로 제공 가능한 여유시간을 나타내어 이를 일치시키는 수준에서 RCF의 수량이 결정된다.

<표 1> 군의 주요장비 M/F 인가기준

기 준	1-2%	3%	4%	5%	7%
장 비	개인화기, K-3기관 총, 무전기	155mm 자주포,비 호,천 마	K-9 지주포, 105mm 곡사포, 감시장비	구난전차, 지휘용장 갑차	K-1전차, K-200 장갑차

식 (1), (2)는 장비 가동일 수의 평균에 근거하여 M/F 수량을 결정함으로써, 고장의 분산이나 분포가 다른 특성을 보이는 장비에 대해서도 평균만 같다면 동일한 M/F 수준을 확보하게 하는 결과로 이어져 장비별 고장 특성을 고려하지 못하는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구는 고장 특성을 반영하여 M/F 수량을 결정할 수 있는 수리적 모형을 제시하고 그 결과를 적용하여 적정 M/F 수준을 결정하는 사례를 제시하고자 한다. 본 연구에서는 주로 ORF의 최적 수량 결정에 관한 문제를 다루지만, RCF에 대한 분석도 동일한 모델로 가능하다.

현재 육군의 M/F 선정은 전투 임무수행에 필수적인 군 표준장비, 최근 3년간 정비실적에 의거 입고기간이 장기간 소요되는 장비, 완성장비를 선정하는 것으로 원칙으로 하되, 완성장비의 선정이 비 경제적이거나 획득(Acquisition)이 어려운 경우에는 주요 구성품 단위로도 선정가능하다. 또한, 주요 장비의 정비대충장비의 확보 비율은 장비의 종류와 특성에 따라 1-7%로 다양하다 [9]. 그 내용은 <표 1>과 같다.

2.2 기존 연구

M/F 수준 결정을 위한 기존 연구는 대기이론을 활용한 기계고장 모형에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다. Levine [3], Lehtonen [4], Gupta & Srinivasa [5], Gupta & Rao [6], Wang Kuo [7] 등의 연구가 기계고장 모형을 활용한 M/F 수준

결정 문제를 다루고 있다. 그러나, 이 연구들은 모두 서버가 고장날 경우에 여유 서버를 활용하는 기계고장 모형에 대한 결과를 제시하고 있어, 운용 장비가 고장날 경우에 고장의 경중(輕重)을 파악하여 M/F를 투입하고 고장난 장비는 수리후 M/F로 충당함으로써 가용도를 높이고자 하는 현재 군의 M/F 운용 현실과는 차이가 있는 모형이다. Wang & Lee [8]는 현재 군에서 활용하고 있는 M/F의 개념과 유사한 다수의 운영장비와 예비장비가 있고 수리공이 하나 있는 시스템을 대기행렬 모형으로 분석했다. 그러나, 이 모형은 고장이 발생하면 즉시, M/F 장비를 활용하는 모형에 관해 분석한 것으로서, 중(重)고장시 고장장비와 1:1로 M/F를 교환하는 군의 운용 개념과 정확하게 일치하지는 않는다.

Madu [10], 박찬우 [11], 이석준 외 [12]은 대기행렬 네트워크를 이용하여 M/F의 최적 재고 수준을 결정하는 문제를 분석했다. Madu [10]는 장비 고장시 수리시간이나 난이도에 따라 경수리와 중수리를 구분하고 그에 따른 수리 시간의 차이를 반영했다는 점에서 의의가 있다. 박찬우[3]는 다단계 수리체계의 성능척도를 고장간격과 수리시간을 Coxian 분포로 가정하여 분석했다. Madu [10]와 박찬우[11]는 폐쇄형 대기행렬 네트워크를 이용한 반면, 이석준 외 [12]는 개방형 네트워크 이론을 활용하여 기계고장 모형과 유사한 서버 고장 현상을 분석하였다. 대기행렬 네트워크를 이용한 분석은 현실에 대한 설명력은 높으나, 모델이 복잡하고 방법론의 난이도가 높아 실무에서 응용하기 어려운 단점이 있다.

한편 운영가용도/신뢰도와 M/F 재고 수준의 상관관계를 시뮬레이션과 회귀분석을 통해 메타모델 방정식을 구성한 후 선형계획법을 활용하여 적정재고 수준을 판단하는 연구가 Kuei와 Madu [13], Madu 외 [14], 강훈 [15], 이순호 [16], 유승낙 [17]에 의해 수행되었다. 특히 강훈, 이순호, 유승낙 [15-17]은 군의 사례를 연구했다는 점에서

의의가 있다. 다만, 위 연구들은 시뮬레이션을 활용한 메타모델 방정식 구성으로 분석적(Analytic) 결과를 제시하지 못했다는 단점이 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 현재까지는 육군의 M/F 운용개념과 일치하는 모형을 분석한 연구가 없으며, 방법론 측면에서도 대기행렬 네트워크와 같이 난이도가 높은 이론을 사용함으로써 실무에서 활용하기 어렵거나, 메타 모형을 활용하여 결과 활용에 한계가 있는 문제점이 있었다. 본 연구에서는 육군의 M/F 운용 현실을 정확히 반영하는 모델이 출생사멸과정의 일반화된 형태인 준출생사멸과정(Quasi Birth-death process)을 따르는 것을 보이고, 준출생사멸과정의 특수한 형태에 착안하여 흡수마코프체인(Absorbing Markov Chain)을 활용하여 초기확률과 다양한 성능척도를 유도할 것이다. 본 연구는 기존의 연구에 비해 M/F 운용현실을 정확하게 반영할 뿐아니라, 대기행렬 네트워크에 비해 상대적으로 복잡하지 않는 방법론을 활용하여, 분석적 (Analytic) 결과를 유도할 수 있다는 점에서 큰 의미가 있다.

3. 적정 M/F 수준 판단 모형

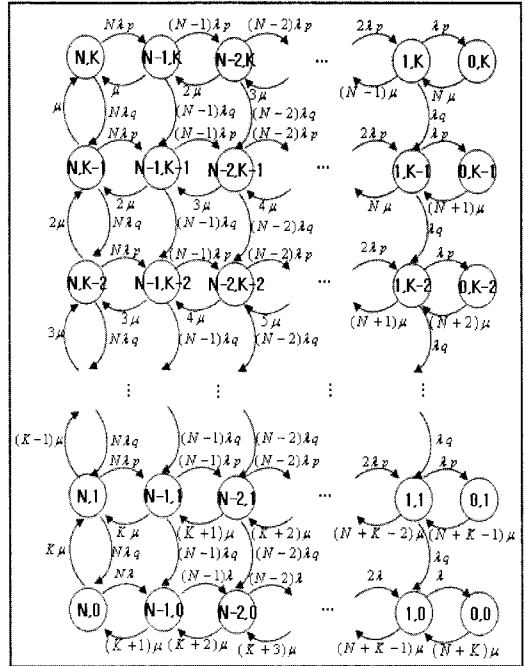
3.1 모형 및 가정

K-1전차에 대한 운영유지 대충장비(ORF)의 소요는 주로 3계단 수리(사·여단의 직접지원 책임부대인 정비대에서 이루어지는 수리)에서 2,000만 원 이상인 고단가 품목에 대한 수리지원시 주로 발생되며, 경미한 고장인가 중대한 고장인가를 판단하여 M/F의 사용 여부를 결정한다. 본 연구의 M/F판단 기계수리 문제는 단일수리소(정비대)에 의해 유지되는 N 대까지 고장이 발생 할 수 있는 동일유형 기계에 대한 해석 문제로 각각의 장비는 고장률 λ 로 고장이 발생하고, 고장시 수리소로 즉시 보내어지며, 고장수리는 평균 $1/\mu$ 로 이루어진다고 가정한다. 또한, 경미한 고장이

(확률 p 로) 발생하는 경우에는 M/F 투입없이 고장장비를 수리하여 다시 사용하고, (확률 $q=1-p$ 로) 심각한 고장 발생 시는 M/F장비가 사용된다. 서버에서 장비에 대한 수리시간은 지수분포를 따르며 서비스율은 수리를 위해 대기하고 있는 장비대수에 무관하고 모든 단계의 서비스는 독립적이고 동일한 조건이며, 수리소의 수리능력은 $N+K$ 대까지 동시에 수리가능하다고 가정한다. 본 연구의 가정 및 기호를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 운용기계대수 : N 대, M/F장비수 : K 대
- 2) 고장은 각 장비별로 Poisson Process (λ) (이하 $PP(\lambda)$) 에 따라 발생한다.
- 3) 고장난 기계의 고장 수리시간은 평균이 $1/\mu$ 이고 지수분포다.
- 4) 고장발생때 확률 p 로 M/F를 사용하지 않는 경(輕)고장이, 확률 $q(=1-p)$ 로 M/F를 사용하는 중(重)고장이 발생한다.
- 5) 운용장비가 N 대 미만으로 가동되고 있는 경우 수리된 장비는 운용장비로 충당한다.

6) 상태(State)는 $(N(t), J(t))=(t$ 시점의 운용대수, t 시점의 M/F수)로 정의된다.



<그림 1> 상태전이 다이어그램

$$A_N = \begin{bmatrix} -N\lambda & N\lambda q & 0 & \dots & & & & 0 \\ \mu & -N\lambda - \mu & N\lambda q & & & & & \vdots \\ 0 & 2\mu & -N\lambda - 2\mu & N\lambda q & & & & \\ \vdots & & & & \ddots & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ 0 & & & & & & (K-1)\mu & -N\lambda - (K-1)\mu & N\lambda q \\ & & & & & & K\mu & -N\lambda - K\mu & \end{bmatrix},$$

$$A_i = \begin{bmatrix} -i\lambda - (N-i)\mu & i\lambda q & 0 & \dots & & & & 0 \\ 0 & -i\lambda - (N-i+1)\mu & i\lambda q & & & & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & & & \vdots \\ & & & & & & & 0 \\ & & & & & & & i\lambda q \\ 0 & & & & & & 0 & -i\lambda - (N-i+K)\mu \end{bmatrix} \quad (i=0 \sim N-1),$$

$$B_i = \begin{bmatrix} i\lambda p & 0 & \dots & 0 \\ 0 & i\lambda p & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \\ 0 & \dots & 0 & i\lambda p \end{bmatrix} \quad (i=1 \sim N), \quad C_i = \begin{bmatrix} (N-i)\mu & 0 & \dots & 0 \\ 0 & (N-i+1)\mu & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & & (N-i+K)\mu \end{bmatrix} \quad (i=0 \sim N-1).$$

<그림 2> 전이율 행렬의 부분 행렬

7) 안정상태 확률

$$\pi_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr [N(t) = i, J(t) = j]$$

$$(i = 0, 1, \dots, N, \quad j = 0, 1, \dots, K).$$

앞서 정의에 상태 정의에 따라 상태전이 다이어그램(Transition Rate Diagram)을 그리면 <그림 1>과 같다. 만약, 현재 시스템에서 운용장비가 총 N대이고, 정비대충장비를 K대 운용하고 있다고 가정한다면, 고장은 $PP(N\lambda)$ 로 발생하고, 고장 발생시 경미한 고장이 발생하면 상태(State)는 $(N-1, K)$ 로 전이되고, 중고장이 발생하면 M/F를 즉시 사용하므로 상태가 $(N, K-1)$ 로 전이된다. 상태 (N, K) 에서 경미한 고장은 $PP(\lambda p)$ 로 발생하고 중한 고장은 $PP(\lambda q)$ 로 발생한다. 한편, 서비스율은 고장난 장비가 두 상태 모두 1대이므로 μ 다. <그림 1>의 상태전이 다이어그램을 상태전이 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} A_N & B_N & 0 & \dots & 0 \\ C_{N-1} & A_{N-1} & B_{N-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & & & & & \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & C_1 & A_1 & B_1 \\ 0 & \dots & 0 & C_0 & A_0 & \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)의 원소들을 이루고 있는 A_i, B_i, C_i 에 대한 정의는 <그림 2>에 제시되어 있다.

식 (3)의 전이율행렬의 안정상태확률, $\pi_{i,j}$ 는 특정 상태에 체류하게 될 시간평균확률 (Time-average Probability)이며, 다음과 같은 식을 만족하는 해이다.

$$\pi Q = 0, \quad \sum_{i,j} \pi_{ij} = 1. \quad (4)$$

식 (4)를 만족하는 해는 전이율행렬 Q 의 Rank가 $\dim(Q)-1$ 이므로 모든 확률의 합이 1이라는 정보를 추가하여 구한다. 그러나, Q 의 행렬구조가 준출생사멸과정의 특징을 가지고 있으므로 $\pi_{n-} = (\pi_{nK}, \pi_{nK-1}, \dots, \pi_{n1}, \pi_{n0})$ 로 정의한다면 식 (4)의 해는 π_{0-} 을 모수로 갖는 다음과 같은 식으로 표현 가능하다.

$$\pi_{1-} = \pi_{0-}(-A_0)(B_1)^{-1} = \pi_{0-}R_1$$

$$\pi_{2-} = \pi_{0-}\{R_1(-A_1) - C_0\}(B_2)^{-1} = \pi_{0-}R_2 \quad (5)$$

$$\pi_{n-} = \pi_{0-}\{R_{n-1}(-A_{n-1}) - R_{n-2}C_{n-2}\}(B_n)^{-1} = \pi_{0-}R_n$$

$$(n = 2, \dots, N)$$

식 (5)에서 π_{0-} 만 구한다면 모든 안정상태확률 π 를 구할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 흡수마코프체인을 활용한 초기확률 (π_{0-}) 유도

본 절에서는 식 (5)의 유일한 미지수인 π_{0-} 를 흡수마코프체인을 활용하여 구하는 방법에 대해서 살펴볼 것이다.

상태 중 일부가 흡수(Absorbing)상태인 마코프 체인(Markov Chain)을 흡수 MC이라 한다. 일단 그 상태로 전이가 일어나기만하면 더 이상 다른 상태로의 전이가 불가능한 상태를 흡수상태라고 한다. 흡수 MC에서 흡수상태가 아닌 다른 상태들을 모두 일시(transient)상태라고 하는데, 이들 상태로의 전이는 한시적으로만 가능하며 언젠가는 모두 흡수상태 중 하나로 흡수된다. 흡수 MC의 주요 관심사는 일시상태에서 흡수상태 중 어떤 상태로 흡수될 것인가와 일시상태에 얼마나 오래 머물 것인가 하는 것이다 [18].

다음과 같은 상태전이 행렬을 갖는 흡수마코프 체인을 가정하자.

$$P = \begin{bmatrix} A_T & A_A \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

A_T 는 일시상태들 간의 전이율 행렬이고, A_A 는 일시상태로부터 흡수상태로의 전이율 확률로 구성된 행렬이다. 식 (6)에 알 수 있듯이 흡수상태로 한번 전이하기만 하면 더 이상의 전이가 불가능하므로, 흡수상태로부터 다른 상태로의 전이율은 모두 0이다. 흡수 MC의 주 관심사중 하나인, 현재 상태 k 에 있는데, 흡수될 때까지 상태 l 에 머무는 시간의 기대치 E_{kl} 는 다음과 같이 정의될 수 있다. (자세한 내용은 이호우 [18]을 참고 바람.)

$$E_{kl} = [(-A_T)^{-1}]_{kl} \quad (7)$$

π_{0j} 는 시간 평균 확률의 특성상, 재생보상정리(Renewal Reward Theorem)에 의해 (0,j) 상태에서 출발하여 다시 (0,j) 상태를 방문하는 기간을 하나의 재생주기(Renewal Cycle)로 지정할 때, 한 재생주기에서 (0,j)를 떠나기 전에 머물렀던 시간으로 정의할 수 있다. 식 (3)의 전이율 행렬에서 (0,j)에 해당하는 상태를 제일 마지막으로 이동시킨 후 마지막 행만 모든 원소를 0으로 대체하면, 식 (6)과 같은 흡수 MC를 구성할 수 있으며, 이는 (0,j)를 흡수 상태로 하는 MC이 된다. 이와 같이 P 가 정의된다면 π_{0j} 는 Cycle 분석에 의해 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\pi_{0j} = \frac{1/(N+K-j)\mu}{1/(N+K-j)\mu + \sum_l [-A_T]_{(1,j)l}} \quad (8)$$

식 (8)은 다음과 같이 설명가능하다. (0,j)에서 전이 가능한 상태는 (1,j)뿐이며 전이까지 걸리는 평균시간은 $1/(N+K-j)\mu$ 이다. 또한, 식 (7)에 의해 상태 (1,j)에서 시작해서 흡수될 때까지 각 노드 l 에 $[-A_T]_{(1,j)l}$ 만큼 체류하므로 흡수될 때

까지 소요되는 평균시간은 $\sum_l [-A_T]_{(1,j)l}$ 이 된다.

한편, π_{0j} 는 시간평균 확률이므로 Renewal Reward Theorem에 따라 식 (8)이 성립한다.

식 (8)에 의해 π_{0-} 를 구한다면 식 (5)를 통해 Q 의 안정상태확률을 구할 수 있다.

3.3 성능척도(Performance measures)

식 (5)와 식 (8)을 통해 구한 안정상태확률을 기초로 분석에 필요한 다양한 성능척도를 도출할 수 있다. M/F 수준 결정과 관련되어 활용되는 성능척도는 시스템에 고장난 장비수, 시스템에 작동 중인 장비수, 서버(정비대)가 Idle/busy상태, 정비 여유대수, Machine Availability(M.A.), Operative Utilization(O.U.)등이 있고 이를 활용하여 본 연구의 적정 운영유지 대충장비수와 효율적인 인가비율을 제시 할 수 있다.

- 1) 정비대가 Idle상태일 확률 : $P[I] = P_{NK}$
- 2) 정비대가 Busy상태 기대치 : $P[B] = 1 - P[I]$
- 3) 시스템에 작동중인 평균 장비수 :

$$E[Oper.] = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^K (i+j)P_{ij}$$

- 4) 시스템에 고장난 평균 장비수 :

$$E[Breakdown] = (N+K) - E[Oper.]$$

- 5) Machine Availability(M.A.) :

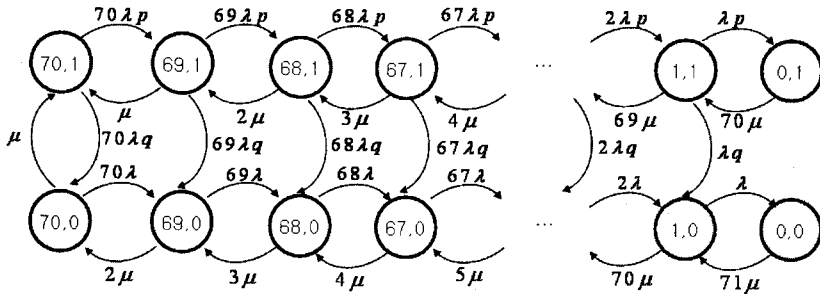
$$M.A. = \frac{E[Oper.]}{N+K}$$

- 6) Operative Utilization(O.U.) : $O.U. = E[B]$

- 7) 정비여유대수 :

$$\#(O.R.F) = 0.95(N+K) - E[Oper.]$$

이상과 같이 다양한 성능척도가 있지만, 본 연구에서는 주로 5) M.A. 와 7) 정비여유대수를 활용하도록 하겠다. M.A.는 기계고장 모형에서 가장 활용이 많이 되는 성능척도이며, 정비여유대수는 기대되는 장비 운용도를 충족시키기 위해 필



<그림 3> (70,1)모형 상태전이 다이어그램

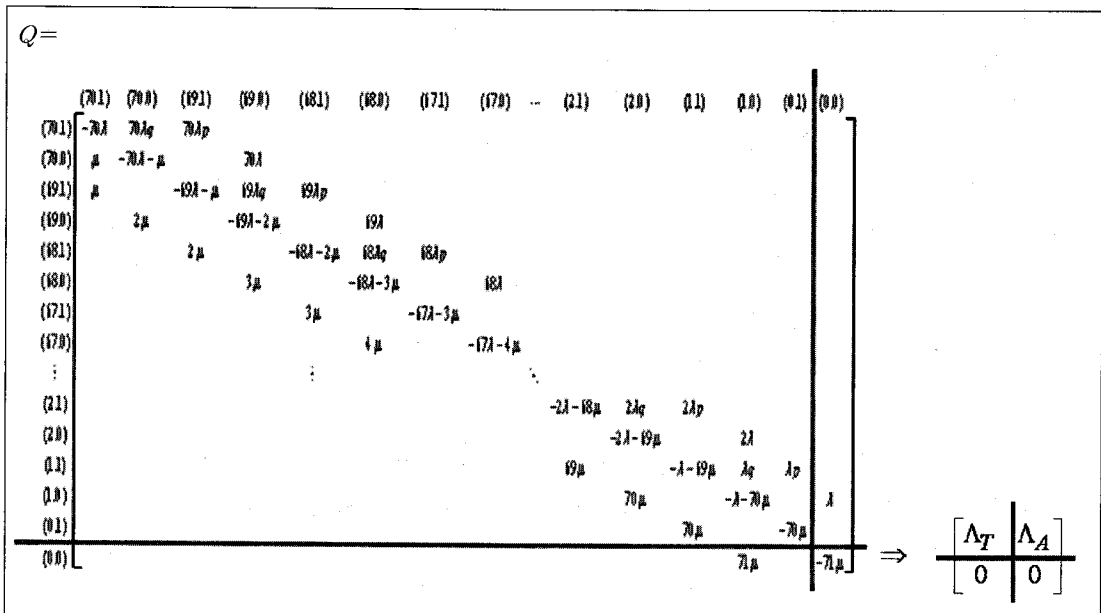
요한 여유 장비의 숫자로써, M/F 수준 결정에 필요한 정보를 제공한다. 정비여유대수 산출시 장비 운용도는 95%로 적용하였으나, 무기체계 특성에 따라 운용도를 변경하는 것이 가능하다.

4. 모형 적용 및 결과 분석

본 장에서는 육군에서 수집된 K-1전차의 고장 자료 및 관련 자료를 토대로, 3장에서 분석 모형을 활용하여 현재 M/F 수준의 타당성을 분석하고 적정 M/F 수를 제시한다.

육군의 동일 유형 O개 부대를 분석한 결과 평균 70대의 K-1전차를 보유하고 있으므로 상급제대의 M/F인가비율 7% 적용시 4~5대의 예비 전차를 운영하고 있어야 하나 실제 가격(군 예산) 및 운용 측면의 불확실성으로 M/F전차를 실제로 보유하고 있지 않고 있으며, 인가 또한 0~1대로 반영되어있다.

현재 육군에서 K-1전차는 운용부대에서 일일, 주간, 월간, 분기, 연간, 특별정비 등으로 나누어 1차적으로 부대정비가 이루어지고, 그 외 추가 정비소요 발생시 사·여단 정비대대나 창 정비 등



<그림 4> 상태전이 행렬과 흡수 마코프체인

을 통해 정비가 이루어지도록 되어있다. 그리고 이러한 기록은 '장비종합 이력부'에 기록하도록 되어있다. 자료 수집은 3계단정비가 주로 이루어지는 고단가 품목에 대한 장비고장을 중심으로 하였고 야전에서 운용중인 고단가 품목은 육규 412 소요관리규정 및 ASL¹⁾ / PL²⁾ 선정 목록을 바탕으로 하여 기갑여단 진차대대의 '장비종합 이력부'를 중심으로 정비대 지원통제과의 연간 3계단 정비실적 자료를 수집 활용하였다.

수집된 자료를 분석한 결과 A부대에서 운용중인 K-1전차를 기준으로 운영유지 대충장비 수는 1대, 고장률(λ)은 0.0265, 서비스율(μ)은 0.01258, 중수리를 요하는 고장일 확률은 $q=0.22$, 경수리를 요하는 고장일 확률 $p=0.78$ 로 도출하였다. 이 모형의 상태전이 다이어그램은 <그림 3>과 같으며, 이에 대한 상태전이 행렬은 식 (3)을 활용하여 <그림 4>와 같이 도출할 수 있다.

한편, <그림 4>는 상태 (0,0)을 흡수 상태로 보고 π_{00} 을 구하기 위해 흡수 MC를 어떻게 구성해야 하는 가를 나타내고 있다. (0,0) 상태와 관련된 행의 전이율을 모두 0으로 바꾸는 것으로 식 (6)과 같은 흡수 MC이 구성되는 것을 확인할 수 있다. 식 (8)의 결과를 활용하여, π_{00} 는 다음과 같이 구할 수 있으며, 이 결과와 식 (5)를 통해 모든 안정상태 확률을 유도할 수 있다.

$$\pi_{0,0} = \frac{1}{71\mu} \sum_i [(-A_T)^{-1}]_{(1,0)i} + \frac{1}{71\mu}$$

- 1) 인가저장품목(ASL : Authorized Storage List) : 각급 보급기관에서 현 보유운용을 지속하고 장차 예측되는 소요를 충당하기 위하여 항상 저장 유지하도록 인가된 보급품의 총목록
- 2) 규정 휴대량(PL : Prescribed Load) : 편성부대에서 부대 정비를 위해 보유하도록 인가된 15일분의 수리부속품의 자산을 뜻한다.

<표 2> 성능척도 결과

순서	성능척도	결과
1)	시스템 Idle 확률	0.0001
2)	시스템 Busy 확률	0.9999
3)	시스템에 작동중인 평균 장비 수	64.56 대
4)	고장난 평균 장비수	6.44 대
5)	장비 가용도(M.A.)	90.9%
6)	서버운용도(O.U)	99%
7)	추가정비여유대수	2.89대

이렇게 구한 안정상태 확률로부터 3장의 성능척도 정의를 활용하여 <표 2>와 같이 성능척도를 구할 수 있다.

운용장비수 70대, M/F장비수 1대인 현실문제에 대한 성능척도 분석결과 <표 2>와 같이 시스템내 작동중인 장비수는 총 64.56대, 추가 정비 여유대수는 2.89대로 나타났다. 시스템내 작동중인 장비수 64.56대는 총 운용장비의 목표운용도 95% 즉, 시스템내에 작동중인 장비수가 67.45대 이상이어야 하는 조건에 대해 2.89대가 부족함을 알 수 있었다. 또한, 장비 가용도는 90.9%이며 서버 운용도는 99%로 분석되었다. <표 2>의 결과로 볼 때, 장비의 목표 운용도를 만족하기 위한 기갑여단의 운영유지 대충장비수는 현재 인가된 0~1대로는 부족하다고 볼 수 있으며, 약 4대로 인가 운용될 필요가 있다. M/F를 3대 추가 확보하면 장비가용도는 기존 90.9%보다 각 부대별로 4~5% 향상되어 95%를 넘어서며, 서버 운용도는 약 4% 하향 조정되어 서버운용(정비지원)의 여유를 보장해줄 수 있다.

본 결과에 대하여 실제 A기갑여단의 전시 장비 손실을 판단결과를 활용하여 효용성을 살펴보면 다음과 같다.

A부대의 00 역습 작전 후 궤도차량의 피해결과 중과, 소파에 대해서는 정비대의 직접지원을 통한 현장정비가 가능하나 완/대파시 즉각적인 M/F장비가 미 보충 될 경우 위 개입결과 지속적인 작전

<표 3> OO 역습 작전후 장비피해 현황 (K-2008적용)

구분	현재	복원 소요			
		소요	원/대파	중파	소파
계	△△△	△△	△	△	△
K-계열 전차	▽	▽	3~4	▽	▽
K-계열 장갑차	○○○	○	○	○	○
자주포	◇◇	◇	◇	◇	◇

수행이 제한된다고 판단되었다 (M/F미 보충시 12시간 기준 전투력 100% → 66%로 하향됨).

<표 3>은 OO 역습작전후 장비피해 현황으로 완/대파가 3-4대로 나타나고 있다. 이 결과를 통하여 현재 반영된 K-1전차 운용유지 대충장비의 인가 0~1대로는 작전의 효율성을 뒷받침할 수 없다는 것을 알 수 있고, 본 모형을 통해 제시된 K-1전차의 인가량 3대는 장비운용 및 작전효율성 측면에서도 적절한 수량인 것으로 확인할 수 있다. 한편, 현재 상급부대에서 제시한 인가기준 7%는 초과인가로써 4~5%로 하향 조정 할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 역습부대역할을 수행하는 ○○부대에서 운용되고 있는 K-1전차 고장자료를 분석하여 K-1전차의 운영유지 대충장비의 최적 수량을 산출하고 상급제대의 정비대충장비 인가산정에 대한 의사결정을 위하여 대기행렬이론과 흡수 MC를 활용하여 유용한 성능척도를 유도하였다. 연구결과 현재 ○○부대의 정비대에서 보유해야 할 최적의 K-1전차 운영유지 대충장비는 4대라는 결과가 산출되었고, 상급제대에서 하달된 사·여단의 K-1전차의 M/F인가비율 7%의 인가기준도 4~5%로 재정립할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

본 연구는 평균에 의해 분석되는 M/F 수준에 대한 판단을 부대별, 장비별 속성을 반영할 수 있도록 대기행렬 이론을 사용하여 판단할 수 있는 모형을 제시하고 실제 야전의 현실에 적용하여 의사결정 기준을 제시했다는 점에 의의가 있다. 특히, 분석 과정에서 초기 확률을 구하기 위해 흡수 MC를 활용한 것은 준출생사멸과정을 분석할 때 유용하게 사용할 수 있는 기법으로 앞으로 다양한 준출생사멸 과정으로 모형화 되는 현실을 분석할 때 활용될 것으로 기대된다.

향후 연구로는 이 모델을 다양한 무기체계와 부품에 적용하여 현재 M/F 수준에 대해 평가하는 정책적인 방향과 모형의 현실 설명력을 높이기 위해 고장 발생이나, 서비스를 지수 분포가 아닌 일반화된 분포의 경우로 확장하는 방안에 대해서도 연구할 필요가 있을 것으로 사료된다. 또한, 다단계 수리의 경우 각 단계별 M/F 수준에 대한 의사결정을 수행할 수 있는 모형에 대한 연구도 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 이상현, 윤봉규, "국방무기체계 획득사업의 혁신적 추진전략과 방법론," IE Interface, Vol.20 (3), pp.363-375, 2007.
- [2] 육군본부, 육군규정 : 432 장비 및 물자정비 규정, 육군본부, 2004.
- [3] Levine,B., "Estimating Maintenance Float Factors on the Basis of Reliability Theory," Industrial Quality Control, Vol.22 (2), 401-405, 1965.
- [4] Lehtonen,T., "On the Optimal Policies of an Exponential Machine Repair Problem," Naval Reserch Logistics, Vol.31 (1), 173-181, 1984.
- [5] Gupta,U.C. and Srinivasa,R.T.S.S., "On the M/G/1 machine interference model with spares," European Journal of Operational Research, Vol.89 (1), 164-171, 1996.
- [6] Gupta,U.C. and Rao,T.S.S., "Performance modeling M/G/1 machine repairman prob-

- lem with cold-, warm- and hot-standbys," Computers & Industrial Engineering, Vol.38 (2), 251-267, 2000.
- [7] Wang,K.H. and Kuo,M.Y., "Profit analysis of the $M/E_K/1$ machine repair problem with a non-reliable service station," Computers & Industrial Engineering, Vol.32 (3), 587-594, 1997.
- [8] Wang,K.H. and Lee,H.C., "Cost Analysis of the Cold-Satndby M/M/R machine repair problem with multiple modes of failure," Microelectron Reliability, Vol.38 (3), 435-441, 1998.
- [9] 윤봉규, 차건호, "Capacity Pooling을 활용한 육군항공 M/F 장비 수 결정에 관한 연구," 로지스틱스 연구, 2008.
- [10] Madu,C.N., "A Closed Queueing maintenance network with two repair centers," Operational Research Society, Vol.39 (10), 959-967, 1988.
- [11] 박찬우, "다단계 수리체계의 성능평가를 위한 폐쇄형 대기행렬 네트워크모형," 한국경영과학회, Vol.25 (4), 27-44, 2000.
- [12] 이석준, 박일광, 공명복, "신뢰할 수 없는 서비스 스테이션에서 정비여유대수의 결정," 대한산업공학회, 2004.
- [13] Kuei,C.H. and Madu,C.N., "Polynomial decomposition and Taguchi design for maintenance float system," European Journal of Operational Research, Vol.72, 364-375, 1994.
- [14] Madu,C.N. Kuei,C.H. and Chen,J.H., "a decision support systems approach to adjust maintenance float system availability levels," Computers & Industrial Engineering, Vol.28 (4), 773-786, 1995.
- [15] 강훈, "예산 제약하 예비장비 및 모듈의 적정 재고수준판단연구," 국방대학교, 2003.
- [16] 이순호, "ARENA를 이용한 수리부속품목 적정재고수준 판단 모델 연구," 국방대학교, 2001.
- [17] 유승낙, "F-16 항공기 예비엔진 및 모듈 적정 재고수준 판단 연구," 국방대학교, 2002.
- [18] 이호우, 대기행렬이론, 제3판, 시그마프레스, 2006.

■ 저자소개 ■

김 용 (E-mail: jitong7@naver.com)

1998 육군3사관학교 기계공학과 졸업(학사)

2008 국방대학교 운영분석과 졸업(석사)

현재 육군종합군수학교 개념발전/무기체계 교관

관심분야 군사OR, 대기행렬, 생산계획

윤 봉 규 (E-mail: bkyoon@kudu.ac.kr)

1996 연세대학교 경영학과 졸업(학사)

1998 한국과학기술원 산업공학 졸업(산업공학 석사)

2002 한국과학기술원 산업공학 졸업(산업공학 박사)

현재 국방대학교 운영분석학과 조교수

관심분야 Biz. Performance Optimization, Stochastic Models & Queueing Theory, Military O.R.