신뢰성응용연구
제16권, 제4호. pp.313-322, 2016

예방정비를 고려한 복수 부품 시스템의 신뢰성 분석: 마코프 체인 모형의 응용

김헌길[1] · 김우성[2†]

[1] 국방기술품질원, [2]한동대학교 경영경제학부

Reliability Analysis of Multi-Component System Considering Preventive Maintenance: Application of Markov Chain Model

Hun Gil Kim[1] · Woo-Sung Kim[2†]

[1]Defense Agency for Technology and Quality
[2]School of Management & Economics, Handong Global University

Purpose: We introduce ways to employ Markov chain model to evaluate the effect of preventive maintenance process. While the preventive maintenance process decreases the failure rate of each subsystems, it increases the downtime of the system because the system can not work during the maintenance process. The goal of this paper is to introduce ways to analyze this trade-off.
Methods: Markov chain models are employed. We derive the availability of the system consisting of *N* repairable subsystems by the methods under various maintenance policies.
Results: To validate our methods, we apply our models to the real maintenance data reports of military truck. The error between the model and the data was about 1%.
Conclusion: The models developed in this paper fit real data well. These techniques can be applied to calculate the availability under various preventive maintenance policies.

Keywords: Availability, Markov Chain, M/G/c/c Queue, Preventive Maintenance.

1. 서 론

오늘날 기술의 발전에 의해 시스템 구조가 점점 복잡해짐에 따라 시스템의 가용도(Availability)를 평가하는 과정 또한 복잡해지고 있다. Na[1]에 따르면 단일부품으로 이루어져 있거나 단순한 구조의 시스템의 경우, 수명이 다하면 시스템이 폐기되거나 시스템 전체가 교체되기 때문에 고장 없이 주어진 기능을 수행하는 시간을 통하여 정의되는 신뢰도(Reliability)가 중요한 성능척도가 되지만, 다수의 부품으로 구성된 시스템의 경우 고장 난 부품만을 수리, 교체하여 주어진 기능을 다시 수행하게 되기 때문에 임의의 시점에서 시스템이 동작 상태에 있을 확률로 정의되는 가용도(Availability)가 중요한 의미를 갖는다. Ross[2]에

† 교신저자: wskim@handong.edu
2016년 9월 5일 접수; 2016년 10월 25일 수정본 접수; 2016년 11월 13일 게재 확정.

따르면 수리 가능한 시스템의 경우 정상 상태와 고장 상태가 반복되는 교대재생과정(Alternating renewal process)로 모델링이 가능하며 시스템의 안정상태 가용도 A는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}. \quad (1)$$

이 때, MTBF와 MTTR은 각각 고장 간 평균 시간(Mean time between failure)과 평균 수리시간(Mean time to repair)을 나타낸다. 이러한 시스템 가용도를 높이는 방법 중의 하나는 적절한 예방정비작업을 수행하는 것이다. 예방정비작업을 통해 각 부품의 이상 여부를 고장 발생 전에 미리 체크하고 수리하는 경우 각 부품의 평균수명이 증가하게 되며, 이는 위의 식에서 MTBF 값이 커지게 됨을 의미한다. 하지만, 점검시간 동안 시스템은 주어진 기능을 수행하지 못하게 되기 때문에 잦은 예방정비작업은 오히려 시스템 가용도를 낮추는 요인이 될 수 있다. 따라서 예방정비작업을 통하여 가용도를 높이기 위해서는 정비작업을 통하여 시스템의 고장률을 얼마나 감소시킬 수 있는지 여부와 함께 적절한 정비간격을 고려하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 마코프 체인과 대기행렬 모형을 이용하여 예방정비작업을 고려한 시스템의 가용도를 분석하고 이를 통하여 효과적인 예방정비작업의 조건을 제시하는 방법을 소개하고자 한다.

Ross[2]에 의하여 초기 신뢰도 분석에 관한 결과가 도출된 이후, 다양한 시스템의 신뢰도 분석을 위하여 확률모형이 개발, 분석되었다. Na[1]은 고장감지장치를 고려한 수리가능시스템의 가용도를 마코프 체인의 안정상태 확률(Steady-state probability)을 통하여 분석하였다. Azaron *et al.*[3]은 마코프 분석 방법을 통하여 중복구조를 갖는 우주정거장통제시스템의 신뢰도에 관한 결과를 제시하였다. Kim[4]은 하나의 대기부품이 복수의 부품 기능을 동시에 수행할 수 있는 다기능대기부품을 갖는 병렬시스템의 신뢰도에 관한 분석을 수행하였다. 그밖에 다양한 시스템의 신뢰도에 관한 결과들이 마코프 분석을 통하여 제시되었다[5-7]. 하지만 이러한 결과들에도 불구하고 예방정책이 가용도에 미치는 영향에 관한 결과는 아직까지 제시된 바 없다. Tirkel[8]에서 언급된 바와 같이, 적절한 예방정비작업은 예측하지 못하는 고장을 방지하고 고장률을 낮춤으로써 시스템 가용도에 긍정적인 효과를 미칠 수 있다. 하지만 예방정비작업 중에 시스템은 제 기능을 수행하지 못하기 때문에 잦은 예방정비작업은 오히려 가용도를 낮추는 결과를 초래할 수 있다. 예를 들어, 다수의 부품으로 구성된 시스템의 모든 개별부품들을 제각각 다른 주기로 정비하게 될 경우 시스템의 가용시간이 줄어들게 되고, 전체 가용도는 오히려 낮아질 것이다. 따라서 예방정비작업에 관한 계획을 수립할 때에는 정비작업이 전체 시스템의 가용도에 얼마나 영향을 미칠지에 관한 분석이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 예방정비작업이 시스템의 가용도에 미치는 영향을 분석하기 위한 확률모형을 제시하고 분석한다. 시스템은 다수의 부품으로 구성되어 있으며 개별부품의 고장이 발생 했을 경우 시스템은 수리가 완료될 때까지 제 기능을 수행하지 못한다고 가정한다. 개발된 마코프 체인 모형을 통하여 다양한 예방정비정책 하에서 시스템의 가용도를 분석할 수 있으며, 계산된 가용도를 통하여 효과적인 예방정비정책을 수립할 수 있다. 모형의 검증을 위하여 실제 군용 수송차량의 정비/운용 데이터에 적용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 본 논문의 시스템의 가정들과 변수들을 소개하고 복수 부품으로 구성된 시스템의 가용도와 시스템 수요가 발생했을 때 시스템이 처리할 수 있는 확률을 분석한다. 제3장에서는 다양한 정비정책에 따른 마코프 체인 모형을 제시하고, 모형들의 가용도를 비교함으로써 효과적인 예방정비정책을 수립하는데 유용한 정보를 제공한다. 제4장에서는 개발된 모형을 군용 수송차량의 정비/운용 데이터에 적용한다. 제5장에서는 본 연구의 의의와 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 다수의 부품으로 구성된 시스템의 가용도

본 장에서는 본 논문에서 다루는 시스템에 관한 가정들과 변수를 제시하고 마코프 체인 모형을 통하여 시스템의 안정상태 가용도와 수요 발생 시 시스템이 가용할 수 있는 확률을 분석한다. 시스템의 안정상태 가용도에 관한 결과는 기존의 결과이기 때문에 결과만을 언급하고, 수요 발생 시 가용 확률은 마코프 체인 모형을 개발, 분석하여 계산한다. 예방정비작업을 고려한 모형에 관하여는 다음 장에서 다룬다. 시스템에 관한 가정들과 변수들은 다음과 같다.

(A1) 전체 시스템은 N개의 하위 시스템(부품)으로 구성된다.

(A2) 부품 $i(i=1, \cdots, N)$의 수명은 평균이 f_i^{-1}인 지수분포를 따른다.

(A3) 부품 $i(i=1, \cdots, N)$가 고장상태가 되면, 전체 시스템은 정지되며 부품 i의 수리가 즉시 시작된다.

(A4) 부품 i의 수리시간은 평균이 r_i^{-1}인 지수분포를 따른다.

(A5) 부품의 고장은 정상상태일 때만 발생하며 수리상태일 때에는 다른 부품의 고장은 발생하지 않는다.

(A6) 각 부품의 수리시간과 정상상태에 머무는 시간은 독립이다.

위는 N 부품으로 이루어진 시스템에 관한 일반적인 가정과 동일하다. 이 때, 시스템의 상태는 마코프 확률 과정으로 표현될 수 있다. 시간 t에서 시스템의 상태를 $X(t)$라고 정의하자. 이 때, $X(t)=0$이면 정상상태, $X(t)=i(i=1, \cdots, N)$ 이면 부품 i의 고장으로 인한 수리상태로 정의하면 연속시간 확률 과정 $X(t)$는 $\{0, 1, \cdots, N\}$ 을 상태 공간으로 갖는 마코프 과정으로 표현할 수 있으며, 시스템의 안정상태 가용도 A는 아래와 같이 임의의 시점에 시스템 상태가 0인 안정상태 확률로 정의된다.

$$A := \lim_{t \to \infty} P[X(t)=0]. \tag{2}$$

평형방정식을 통하여 극한확률을 계산하여 얻어진 시스템 가용도는 다음과 같이 계산되며 이는 Sherwin[9] 등 다양한 문헌에 제시되어 있다.

$$A = \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{N}\frac{f_i}{r_i}}. \tag{3}$$

위 가정 하에서 시스템에 대한 수요가 발생했을 때, 시스템이 가용하지 못한 경우는 두 가지 경우로 나눠진다. 첫 번째는, 시스템이 고장상태라서 수리 중에 있는 경우이다. 고장으로 인하여 수리 중인 경우, 시스템은 발생한 수요에 대응하지 못한다. 두 번째는 시스템이 다른 수요를 처리하고 있는 경우이다. 위의 가용도는 첫 번째 경우는 고려하고 있지만, 두 번째 경우를 고려하고 있지 못하다. 따라서 다음과 같은 가정을 추가한다.

(A7) 시스템에 대한 수요는 도착률이 λ인 포아송 과정으로 발생한다.

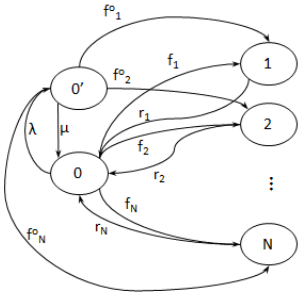
(A8) 시스템이 수요를 서비스하는 시간은 평균이 μ^{-1}인 지수분포를 따른다.

(A9) 시스템의 운용 중에도 고장이 발생할 수 있으며, 고장이 발생하면 즉시 수리를 진행한다.

(A10) 고장이 발생하면 수행 중인 서비스가 중단되며, 다른 시스템이 대신 처리한다고 가정하며 다른 수요를 서비스하는 중에 도착한 고객도 다른 시스템이 대신 처리한다고 가정한다.

(A11) 운용 중 발생하는 부품 $i(i=1, \cdots, N)$ 의 고장 간격은 평균이 f_i^{o-1}인 지수분포이다.

이 경우, <Fig. 1>과 같은 전이율 다이어그램을 갖는 마코프 체인을 통하여 시스템에 수요가 발생했을 때, 시스템이 가용할 수 있는 확률을 계산할 수 있다. 상태공간의 원소 배열은 $\{0, 0', 1, 2, \cdots, N\}$ 과 같으며, 상태 0은 시스템이 가용하며 바쁘지 않은 상태, 0'



$$\begin{bmatrix} -\left(\lambda+\sum_{i=1}^{N} f_i\right) & \lambda & f_1 & f_2 & \cdots & f_{N-1} & f_N \\ \mu & -\left(\mu+\sum_{i=1}^{N} f_i^o\right) & f_1^o & f_2^o & \cdots & f_{N-1}^o & f_N^o \\ r_1 & 0 & -r_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ r_2 & 0 & 0 & -r_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & & \vdots \\ r_{N-1} & 0 & 0 & 0 & \cdots & -r_{N-1} & 0 \\ r_N & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -r_N \end{bmatrix}$$

Fig. 1 Transition rate diagram and matrix to calculate the availability

은 시스템이 다른 수요로 인해 바쁜 상태임을 각각 나타낸다. 상태 $i(i=1, 2, \cdots, N)$ 는 부품 i의 고장으로 인해 수리 중임을 나타낸다.

마코프 체인의 상태 i의 안정상태 확률을 Π_i라고 가정하면 평형방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
&\left(\lambda+\sum_{i=1}^{N} f_i\right)\Pi_0=\mu\Pi_{0'}+\sum_{i=1}^{N} r_i\Pi_i,\\
&\left(\mu+\sum_{i=1}^{N} f_i^o\right)\Pi_{0'}=\lambda\Pi_0,\\
&r_1\Pi_1=f_1\Pi_0+f_1^o\Pi_{0'},\\
&r_2\Pi_2=f_2\Pi_0+f_2^o\Pi_{0'},\\
&\quad\vdots\\
&r_N\Pi_N=f_N\Pi_0+f_N^o\Pi_{0'}.
\end{aligned} \tag{4}$$

위 방정식을 풀면, 임의의 시점에 시스템의 상태가 0일 확률은 다음과 같다.

$$\Pi_0=\frac{1}{1+(\lambda/(\mu+\sum_{i=1}^{N} f_i^o))+\sum_{j=1}^{N}\frac{f_j+f_j^o(\lambda/(\mu+\sum_{i=1}^{N} f_i^o))}{r_j}} \tag{5}$$

포아송 과정(Poisson process)의 PASTA 성질에 의해 식 (5)는 시스템에 관한 수요가 발생했을 때 시스템이 수요를 처리할 수 있는 상태일 확률을 나타낸다. 제4장에서 위 식을 이용하여 새로운 작전 수요가 발생했을 때 군용트럭이 가용한 상태일 확률을 계산한다.

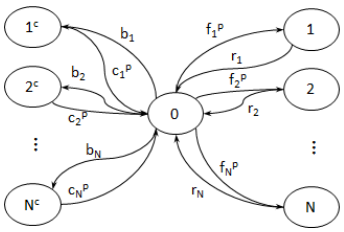
3. 예방정비정책을 고려한 시스템의 가용도

많은 경우, 시스템 가용도를 높이기 위하여 예방정비 정책을 수행하고 있는데, 이는 일반적으로 예방정비정책에 따라 보전 작업을 수행하여 시스템의 고장을 방지하는 것을 의미한다. 고장 이전에 미리 정비를 수행하여 하위 시스템을 점검, 보전함으로써 개별부품들의 고장률을 낮추는 것이다. 예방정비작업은 정책에 따라 고장과는 상관없이 어느 정도의 시간간격을 두고 수행하는 것이 기본 개념이지만 예방정비작업을 위해 시스템을 오랜 시간 이송시켜야 하거나, 어떤 하위시스템의 고장이 다른 하위시스템의 성능에 영향을 미치는 상황에서는 특정 부품의 고장이 발생하게 되었을 때 시스템 전체를 점검하기도 한다. 이러한 정비작업을 통하여 시스템의 고장률을 낮출 수 있지만, 예방정비작업시간 동안 시스템은 가동되지 않기 때문에 잦은 정비는 오히려 가용도를 낮추는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 효과적인 예방정비정책을 수립하기 위해서는 정비작업이 전체 가용도에 미치는 영향을 분석해야 하며, 본 장에서는 이를 분석하기 위한 마코프 체인 모형을 개발, 분석한다. 개발된 마코프 체인 모형은 다양한 예방정비정책 하에서 가용도를 비교할 수 있도록 하며, 이는 정책 수립에 유용한 정보를 제공할 수 있다. 기본 가정 (A1)~(A6)에 다음과 같은 가정을 추가하며, 부가적으로 필요한 가정들은 예방정비정책에 따른 마코프 체인 모형을 제시할 때 언급한다.

(A12) 예방정비정책 p 하에서 부품 i의 수명은 평균이 $(f_i^p)^{-1}$인 지수분포를 따른다.

(A13) 예방정비정책 p 하에서 부품 i의 예방정비시간은 평균이 $(c_i^p)^{-1}$인 지수분포를 따른다.

가장 기본적인 예방정비정책은 고장 여부와 상관없이 각 부품별로 따로 예방정비작업을 수행하는 것이다. 이 때 부품 i의 점검 간의 시간간격을 b_i^{-1}인 지수분포로 가정하고, i^c를 부품 i가 예방정비 중인 상태로 정의하면 시스템의 전이율 다이어그램과 전이율 행렬은 <Fig. 2>와 같이 표현될 수 있다. 상태 0은



$$\begin{bmatrix}
-\sum_{i=1}^{N}[b_i+f_i^p] & b_1 & \dots & b_N & f_1^p & \dots & f_N^p\\
c_1^p & -c_1^p & 0 & 0 & \dots & \dots & 0\\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & & 0\\
c_N^p & \vdots & \vdots & -c_N^p & & \vdots & \vdots\\
r_1 & \vdots & \vdots & \vdots & -r_1 & & 0\\
\vdots & 0 & 0 & \dots & 0 & \ddots & \vdots\\
r_N & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -r_N
\end{bmatrix}$$

Fig. 2 Transition rate diagram and matrix under the independently maintenance policy

임의의 시점에 시스템이 가용한 상태임을 나타내며 상태 $i(i=1, 2, \cdots, N)$ 는 임의의 시점에 부품 i의 고장으로 인해 시스템이 수리 중인 상태임을 참고하자. 전이율 행렬의 상태들은 $\{0, 1^c, 2^c, N^c, 1, \cdots, N\}$의 순서로 배열되었다.

위 마코프 체인의 시간 t의 상태를 $X_p(t)$로 가정하면, 평형방정식을 풀어 안정상태 확률을 계산할 수 있다. 평형방정식을 구해보면, 안정상태 확률들은 아래와 같이 Π_0으로 표현된다.

$$\Pi_j := \lim_{t\to\infty} P\{X_p(t)=j\} = \begin{cases} (b_j/c_j^p)\Pi_0, & \text{for } j=1^c, 2^c, \ldots, N^c \\ (f_j^p/r_j)\Pi_0, & \text{for } j=1, 2, \ldots, N \end{cases}. \quad (6)$$

예방작업을 통하여 성취된 시스템 가용도(Achieved availability) A_v는 Π_0과 같으며 확률의 총합이 1임을 이용하여 계산하면 가용도는 다음과 같다.

$$A_v := \lim_{t\to\infty} P\{X_p(t)=0\} = \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{b_i}{c_i^p}+\frac{f_i^p}{r_i}\right)}. \quad (7)$$

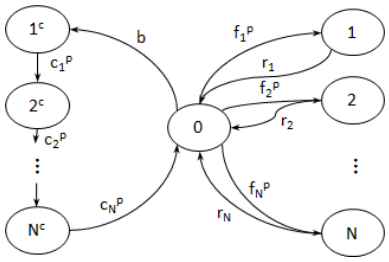
이 때 예방정비작업이 가용도의 측면에서 효과가 있기 위해서는 식 (7)의 시스템 가용도가 식 (3)보다 커야만 한다. 따라서 위 예방정비정책이 효과적이기 위해서는 아래의 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{f_i}{r_i}\right)} < \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{b_i}{c_i^p}+\frac{f_i^p}{r_i}\right)}. \quad (8)$$

이와 같이 마코프 체인의 안정상태 확률을 비교함으로써 효과적인 예방정비작업의 조건을 구할 수 있다.

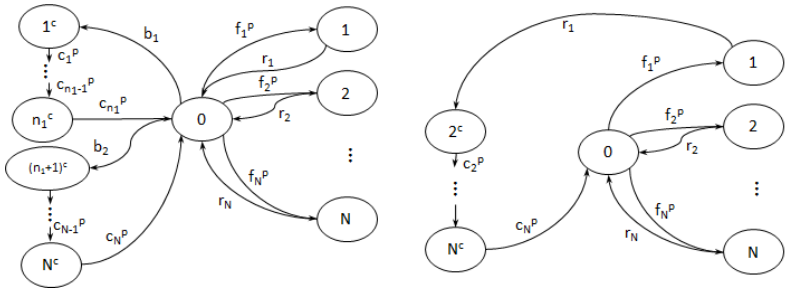
많은 경우, 예방정비작업이 시작되면 하나의 부품만이 아니라 모든 부품들을 순차적으로 점검하게 된다. 이 경우에 정비시간간격을 평균이 b^{-1}인 지수분포라고 가정하면 <Fig. 3>의 전이율 다이어그램과 전이율 행렬을 갖는 마코프 체인을 얻게 된다. 비슷한 방식으로 가용도를 계산하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$A_v = \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{b}{c_i^p}+\frac{f_i^p}{r_i}\right)}. \quad (9)$$



$$\begin{bmatrix} -b-\sum_{i=1}^{N} f_i^p & b & 0 & \cdots & 0 & f_1^p & \cdots & f_N^p \\ 0 & -c_1^p & c_1^p & 0 & \vdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & -c_2^p & \ddots & 0 & \cdots & & \vdots \\ 0 & & & \ddots & c_{N-1}^p & 0 & \cdots & 0 \\ c_N^p & \vdots & \vdots & 0 & -c_N^p & 0 & \vdots & \vdots \\ r_1 & \vdots & \vdots & \vdots & & -r_1 & & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \cdots & & 0 & \ddots & \vdots \\ r_N & 0 & 0 & \cdots & & 0 & 0 & -r_N \end{bmatrix}$$

Fig. 3 Transition rate diagram and matrix for the system



(a) (b)

Fig. 4 Transition rate diagram and matrix under various maintenance policies

위의 가용도와 다른 정책들에서 도출된 가용도 값들을 비교하여, 가용도 측면에서 서로 다른 정책들을 비교할 수 있다. <Fig. 4>에 다양한 정책에 따른 시스템의 전이율 다이어그램들이 나타나 있다.

<Fig. 4(a)>는 부품을 같은 체계에 속하는 두 그룹끼리 나누어 각각 그룹에 따라 정비를 독립적으로 수행하는 경우를 나타낸다. Figure에서는 부품 1부터 n_1이 첫 번째 그룹을 형성하고, 부품 n_1+1부터 N까지가 두 번째 그룹을 형성한다. 정책 하에서 각 그룹을 순차적으로 정비하는데, 예를 들어 첫 번째 그룹을 대상으로 정비가 수행되면 첫 번째 그룹에 속한 모든 부품을 점검한다. 두 번째 그룹에 대해서도 마찬가지로 정비가 시작되면 n_1+1부터 N까지 순차적으로 정비를 수행한다. 위에서 제시한 방식으로 가용도를 계산하면 가용도는 아래와 같다.

$$A_v = \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{f_i^p}{r_i}\right)+\sum_{i=1}^{n_1}\left(\frac{b_1}{c_i^p}\right)+\sum_{i=n_1+1}^{N}\left(\frac{b_2}{c_i^p}\right)}. \quad (10)$$

이를 일반화시켜 N개의 부품을 같은 체계에 속하는 k개의 그룹으로 나누어 정비를 독립적으로 수행할 경우 아래와 같은 결과를 얻는다.

$$A_v = \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{f_i^p}{r_i}\right)+\sum_{i=1}^{n_1}\left(\frac{b_1}{c_i^p}\right)+\sum_{i=n_1+1}^{n_2}\left(\frac{b_2}{c_i^p}\right)+\ldots+\sum_{i=n_{k-1}+1}^{N}\left(\frac{b_k}{c_i^p}\right)}. \quad (11)$$

부품 1부터 n_1이 첫 번째 그룹을 형성하고, 부품 n_i+1부터 부품 n_{i+1}까지가 $i+1$번째 그룹을 형성한다$(i=1, \cdots, k-1, n_k=N)$. 각 부품 그룹 i의 정비 간격은 평균이 $1/b_i$인 지수분포를 따른다.

<Fig. 4(b)>는 따로 예방정비를 수행하지 않고, 첫 번째 부품이 고장 났을 때 해당 부품을 수리한 후 나머지 부품을 정비하는 경우의 전이율 다이어그램을 나타낸다. 따로 정비를 수행하지 않고, 첫 번째 부품이 고장 났을 경우에만, 모든 부품에 대한 정비가 시작된다. 이 경우의 가용도는 아래와 같다.

$$A_v = \frac{1}{1+f_1^p\sum_{i=2}^{N}\left(\frac{1}{c_i^p}\right)+\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{f_i^p}{r_i}\right)}. \quad (12)$$

이와 같이 수리, 점검 시간이 지수분포를 따르게 될 경우 다양한 정비정책에 따른 마코프 체인 모형을 얻을 수 있으며 서로 다른 정책 하에서 가용도를 분석, 비교함으로서 효과적인 정비정책을 수립하는 데 유용한 정보를 얻을 수 있다.

4. 수치예제를 통한 모형의 검증

본 장에서는 앞서 개발된 모형을 실제 군용수송차량의 데이터에 적용하여 모형을 검증한다. 사용되는 데이터는 무기체계의 주 장비를 중심으로 수리부속 보급 및 정비관련 사항을 기록・저장하기 위해 개발된 육군 장비정비정보체계(DELIIS, Defense Logistics Integrated Information System)에 저장되어 있는 자료이며[10], 군용수송차량 400여 대를 대상으로 수집된 6년간(2009년 1월 1일~2014년 12월 31일)의 정비, 운용이력을 대상으로 하였다. 정보체계에는 각 군의 개별부대정비 수준의 정비이력부터 야전정비부대(전문정비 지원부대)의 입고 정비이력과 함께, 장비보유부

Table 1 Categories of maintenance

Classification		Maintenance type	
		Planned maintenance	Unscheduled maintenance
Military unit type	Operator's maintenance Unit	Weekly maintenance, Monthly maintenance, Quarterly maintenance, Semiannual maintenance, Annually maintenance	Daily maintenance
	Field maintenance Unit (Professional maintenance unit)	Recurring maintenance	Mobile maintenance, Warehousing maintenance

대, 정비부대, 정비부품명 및 재고번호, 정비 시작/완료일자, 장비 입/출고일자, 정비종류, 고장영향 등의 정보를 가지고 있다. 시스템 신뢰성을 분석하기 위해서는 수행한 정비가 고장 정비인지, 예방정비인지 구분이 필요하지만 육군 장비정비정보체계에는 고장/예방정비를 구분할 수 있는 별도의 항목이나 정보가 없는 상태이며, 대신 정비종류 항목으로 계획정비, 비계획정비 여부만 구별할 수 있다. 이를 정비주체 부대, 계획정비 여부에 따라 구분하면 <Table 1>과 같다.

보통 예방정비를 계획정비로, 고장정비를 비계획정비로 생각하지만, 엄격히 따지면 두 분류 기준에는 차이점이 존재한다. 고장/예방정비의 기준은 정비활동 이전 고장의 발생 여부에 따라 구분하며, 계획/비계획정비의 기준은 일정한 계획에 따른 정비활동 수행여부에 따라 구분한다. 즉 계획정비 중에도 고장정비가 발생할 수 있으며, 비계획정비 중에도 예방정비의 하나인 주기성 품목의 교환 등이 이루어 질 수 있는 것이다. 하지만 현재 장비정비정보체계의 자료항목만으로는 완벽하게 정비활동을 구분할 수 없으며, 군용장비의 정비정책상 대부분 계획정비는 예방 정비에, 비계획정비는 고장 정비에 해당된다고 볼 수 있으므로 이와 같은 사항을 가정하여 정비이력을 분석하였다. 즉 계획정비에 해당되는 정비는 예방정비로, 비계획정비에 해당되는 정비는 고장정비로 간주하였다. 시스템 가용도를 본격적으로 분석하기 이전에 또 하나 고려해야 할 부분이 바로 고장영향이다. 고장영향은 개별부품의 정비가 발생했을 경우, 전체 시스템의 임무수행 능력에 영향을 미치는 정도를 뜻하며, 정상임무가능, 부분임무가능, 임무불가능 등 3가지 기준으로 구분되어있다. 정상임무가능은 현 상태에서 임무수행은 가능하지만, 추후 정비가 필요한 고장이며, 부분임무가능은 주요기능은 가능하지만, 시스템 성능저하를 유발하는 고장, 임무불가능은 시스템의 기동, 사격 등 주요기능이 불가능한 고장이다. 이 중 시스템의 가용도에 직접적으로 영향을 미치는 고장은 임무불가능 고장이며, 따라서 수집한 군용수송차량 약 2만 건의 데이터 중 임무불가능 고장데이터만 수치예제의 데이터로 활용하였다. 먼저 2장의 Figure 1의 모델에 적용하기 위하여, 가장 정비 실적이 많은 차량을 식별한 뒤 해당 차량의 정비, 운용이력을 분석하여 각 변수들의 값을 계산하였다. 결과는 <Table 2>에 제시되어 있으며 정확한 부품명은 군사자료임을 고려하여 명시하지 않는다. 고장이 가장 많이 발생한 상위 5개 부품을 제외한 나머지 부품들은 정비횟수가 매우 적어(1~2회) 분석결과에 영향이 미비할 것으로 판단하여 제외하였다. 운용 평균수명($(f_i^o)^{-1}$)은 현재의 데이터로는 파악할 수 없어, 기존의 평균수명(f_i^{-1})과 동일하다고 가정하였다. 수요 도착률(평균 차량 이용간격)은 군의 보통 일과시간(오전 9시부터 오후 6시)을 고려하여 산출하였으며, 평균 서비스 시간(일일 평균 가동시간)은 차량 운용이력을 참고하였다. 평균수리시간(r_i^{-1})은 본 모델에서 정비종류는 따로 구분하지 않았기 때문에, 각 부품별로 발생한 모든 정비의 수리시간을 활용하였다. 각 변수들의 분포는 제 2장의 가정과 같이 지수분포를 따른다고 가정하였다. <Fig. 6>에는 군용 수송차량의 하위부품 평균수명에

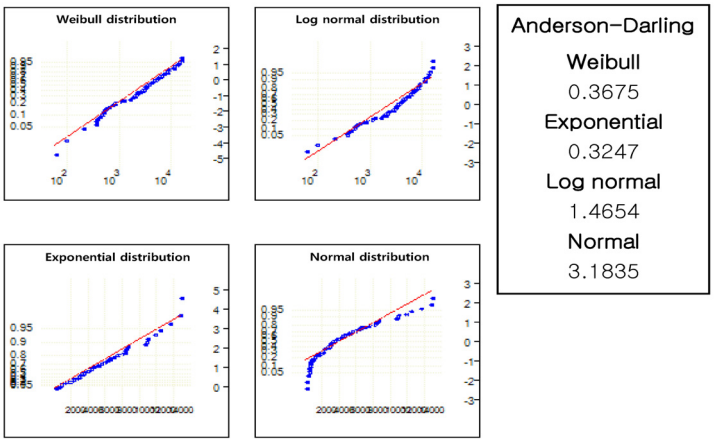


Fig. 5 Result of goodness-of-fit test for subassembly of military trucks

Table 2 Application of equation (5) to the maintenance data of military trucks

Time unit : hour

Component	Mean time to failure(f_i^{-1})	Operational mean time to failure($(f_i^o)^{-1}$)	Mean time to repair(r_i^{-1})	The number of total maintenance
A	4814	4814	2.61	28
B	4998	4998	2.62	19
C	4737	4737	2.16	16
D	3744	3744	4.54	13
E	5482	5482	1.47	11
Arrival rate(λ)	1/24			
Mean service time(μ^{-1})	0.84			
Π_0	0.966			

대한 주요 분포 적합도 검정(Anderson-Darling Test) 결과가 나타나있다. A-D 검정결과 지수분포가 가장 적합한 것을 알 수 있으며, 따라서 각 부품의 평균수명 등을 포함한 변수들의 분포를 지수분포로 가정해도 무방할 것으로 판단한다. 식 (5)의 결과를 적용하여 계산된 시스템이 가용 가능한 비율(Π_0)은 0.966으로 나타난다. 같은 방법으로 다른 트럭의 Π_0까지 산출할 수 있다.

다음은 제3장에서 설명한 모델의 수치 예제를 살펴보자. 해당 예제에서는 고장이 가장 많이 발생한 상위 10개 핵심부품의 임무불가능 고장 데이터를 활용하였다. 이 상위 10개 부품의 정비이력을 예방정비와 고장정비에 따라 분류하면 아래의 <Table 3>과 같다. 부품 F, I, N는 특성상 예방정비를 수행하지 않는 부품이며, 나머지 부품은 예방정비와 고장정비가 모두 발생한 부품임을 알 수 있다. 이 경우 각각 부품 간의 고장, 정비간격이 다르기 때문에 독립적으로 발생했다고 가정하면 <Fig. 3>에 제시한 모델을 적용하여 가용도를 도출할 수 있다. <Fig. 3>의 각 변수들의 값과 시스템 가용도(A_v)는 <Table 4>에 계산되어 있다. 각 변수들의 분포는 제3장의 가정과 같이 지수분포를 따른다고 가정하였다. 식 (7)의 결과를 적용하여 계산된 시스템 가용도는 0.9607로 나타난다. 이 모형이 실제 시스템을 잘 나타내고 있는지 검증하기 위하여 실제 군용차량 400여 대에 관한 데이터를 분석하여 가용도를 계산 하였다. 계산하면 실제 군용차량의 가용도는 0.9499로 계산되는데, 이를 통하여 제시된 모형이 실제와 약 1.137%의 차이가 있음을 알 수 있다.

다음으로 군용차량의 부품에 관한 정비를 현재는 독립적으로 수행하고 있지만, <Fig. 4>와 같이 정비 시 첫 번째 부품부터 순차적으로 모든 부품을 정비하는 방식을 고려하고 있다고 가정하자. 이 경우 두 정책 하의 가용도의 값을 비교함으로써 순차적으로 정비를 수행할 경우 적절한 정비주기의 범위를 결정할 수 있다. 순차적으로 정비하는 정책이 가용도의 측면에서 실효를 거두려면 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{b_i}{c_i^p}+\frac{f_i^p}{r_i}\right)} < \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{b}{c_i^p}+\frac{f_i^p}{r_i}\right)}. \quad (13)$$

평균정비간격(b-1)을 제외한 나머지 변수들의 값은 동일하다고 가정하고 위의 식에 대입하면, 실효를 거두는 평균정비간격이 산출된다. <Table 4>의 숫자들을 대입하면 평균정비간격(b^{-1})이 935시간보다 커야 더 높은 시스템 가용도를 가질 수 있다는 조건이 산출됨을 알 수 있다. 다시 말하면 정비 주기가 935시간 이하일 경우에는, 현재처럼 독립적으로 예방정비를 수행하는 것이 가용도의 측면에서 더 적절하다고 볼 수 있다. 또한 <Fig. 5(a)>와 같이 동일한 체계에 속하는 그룹끼리 나누어 각각 그룹에 따라 정비를 독립적으로 하는 방식을 고려해보자. 각 부품의 체계분류(해당 부품이 장착된 상위 그룹)는 재고번호를 활용하여 장비 기술교범에 존재하는 장비 구조 체계정보를 통해 식별할 수 있다. 10개의 부품을 군용트럭 기술교범을 참고하여 체계에 따라 분류하면 총 3개의 상위그룹으로 분류된다. 각 그룹별 평균정비간격(b_i^{-1}) (i = 1, 2,

Table 3 Frequency of the maintenance for 10 components of military trucks

Component	The number of preventive maintenance	The number of failure maintenance	The number of total maintenance	Group type
F	0	844	844	Clutch group
G	125	509	634	Electrical device group
H	308	314	622	Brake system group
I	0	575	575	Clutch group
J	144	250	394	Brake system group
K	104	196	300	Electrical device group
L	56	197	253	Electrical device group
M	85	182	267	Brake system group
N	0	205	205	Clutch group
O	53	104	157	Electrical device group

Table 4 Avaliability of the system

Time unit : hour

Component	Preventive maintenance		Failure maintenance	
	Mean time between maintenance(b_i^{-1})	Mean time to maintenance($(c_i^p)^{-1}$)	Mean time to failure($(f_i^p)^{-1}$)	Mean time to repair(r_i^{-1})
A			4787	9.4
B	967	2.8	4537	4.4
C	1617	5.9	5983	5
D			4282	8
E	2441	5.7	5148	4.5
F	722	2.9	5466	6.8
G	788	3.2	6072	4.2
H	1323	3.4	5327	3.7
I			9708	12.6
J	358	3.5	5503	6.2
System availability	0.9607			

3)은 각 부품의 기존 예방정비간격의 평균치를 활용하였고, 나머지 변수들의 값은 동일하다고 가정하여 식 (11)에 대입하였다. 그 결과 시스템 가용도는 0.9639로 나타난다. 독립적으로 예방정비를 수행하는 방식보다 가용도가 소폭 증가하는 것을 파악 할 수 있다. 이와 같이 다양한 정책의 경우에 같은 방법으로 가용도를 계산하여 비교함으로써 효과적인 정비정책을 수립할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 마코프 체인 모형을 통하여 예방정비정책을 고려한 복수부품으로 구성된 시스템의 가용도를 분석하는 방법을 제시하였다. 다양한 예방정비정책 하에서 시스템의 가용도를 분석, 비교함으로써 정책들을 비교, 평가할 수 있으며 이는 효과적인 예방정비정책을 수립하는데 유용한 정보를 제공할

수 있다. 제시된 모형을 실제 군용수송차량의 정비데이터에 적용하여 현재 군용수송차량의 가용도를 계산, 검증하였다.

본 논문은 다양한 방향으로 확장될 수 있다. 논문에서는 마코프 체인 모형을 통하여 다양한 정책들을 비교하고 있다. 이러한 다양한 정책 가운데 최적화된 정비정책을 찾는 방법을 제시한다면 정비정책을 수립하는데 보다 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다. 또한 현재 모형 하에서는 수리, 정비간격을 모두 지수분포로 가정하고 있는데 이러한 가정을 확장하여 일반분포를 따르는 가정 하에서 분석한다면 보다 실제에 가까운 결과를 제시할 수 있을 것이다.

References

[1] Na, S. R.(2011). "Reliability Analysis of Repairable Systems Considering Failure Detection Equipments". Korean Journal of Applied Statistics, Vol. 24, No. 3, pp. 515-521.

[2] Ross, S. M. (1996). "Stochastic Processes". 2nd Edition. Wiley, New York.

[3] Azaron, A., Katagiri, H., Kato, K. and Sakawa, M. (2006). "Reliability evaluation of multi-component cold-standby redundant systems". Applied Mathematics and Computation, Vol. 173, No. 1, pp. 137-149.

[4] Kim, D. H., Lee, S. H. and Lim, J. H. (2015). "Reliability analysis of multi-state parallel system with a multi-functional standby component". Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, Vol. 20, No. 4, pp. 75-87.

[5] Coit, D. W. and Liu, J. C. (2000). "System reliability optimization with k-out-of-n subsystems". International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 129-142.

[6] Guo, H. and Yang, X. (2008). "Automatic creation of Markov models for reliability assessment of safety instrumented systems". Reliability Engineering & System Safety, Vol. 93, No. 6, pp. 829-837.

[7] Zhang, T., Long, W. and Sato, Y. (2003). "Availability of systems with self-diagnostic components-applying Markov model to IEC 61508-6". Reliability Engineering & System Safety, Vol. 80, No. 2, pp. 133-141.

[8] Tirkel, I. (2013). "The effectiveness of variability reduction in decreasing wafer fabrication cycle time". In Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World, pp. 3796-3805.

[9] Sherwin, D. J. (2000). "Steady-state desires availability". IEEE Transactions on Reliability, Vol. 49, No. 2, pp. 131-132.

[10] Defense Agency for Technology and Quality (2011). Defense Science Technology Terminology Dictionary.