

## 다기능 시스템의 RAM 목표값 설정을 위한 휴리스틱 기법<sup>§</sup>

한영진\* · 김희욱\*\* · 윤원영\*† · 김종운\*\*

\* 부산대학교 산업공학과, \*\* 한국철도기술연구원

### Heuristic Method for RAM Design of Multifunctional System

Young Jin Han<sup>\*</sup>, Hee Wook Kim<sup>\*\*</sup>, Won Young Yun<sup>\*†</sup> and Jong Woon Kim<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Dept. of Industrial Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

<sup>\*\*</sup> Korea Railroad Research Institute

(Received May 18, 2011; Revised December 5, 2011; Accepted December 15, 2011)

**Key Words:** RAM(신뢰도, 가용도, 정비도), MTBF(고장간 평균시간), MTTR(평균 수리시간), Rolling Stock(철도차량)

**초록:** 많은 기능 또는 임무를 수행하는 다수의 부품들로 구성되어 있는 다기능 시스템 개발에 있어 시스템과 부품의 신뢰도(reliability), 가용도(availability) 그리고 정비도(maintainability)를 결정하는 것은 설계 단계에서의 중요한 일이다. 본 논문에서는 시스템을 구성하고 있는 최하위 부품을 대상으로 개발기준의 시스템 목표가용도(target availability)를 만족하는 각 구성품의 MTBF와 MTTR을 결정하고자 한다. 대안 생성을 위해 휴리스틱 기법(heuristic method)을 개발하였으며, 각 대안의 시스템 가용도와 수명주기비용을 계산하기 위해 시물레이션을 이용한다. 그리고 수치예제를 통해 모형매개변수의 영향을 알아 본다.

**Abstract:** When designing a multifunctional system consisting of many components performing many functions or missions, it is important to determine the reliability, availability, and maintainability (RAM) of the system and components, and we consider system availability to be the optimization criterion. For given intervals of mean time between failure (MTBF) and mean time to repair (MTTR) of the components, we want to determine the values of MTBF and MTTR for all components that satisfy the target availability. A heuristic method is proposed for finding near-optimal solutions through simulation. We also study numerical examples to check effects of model parameters on the optimal solutions.

### 1. 서론

최근 개발되는 시스템은 다양한 사용자의 요구를 만족시키기 위해 첨단화 기술로 개발된 고가의 부품들로 구성되고, 하나 이상의 복합적인 기능을 수행하도록 설계되고 있다. 이에 시스템의 구조가 복잡해지고 요구되는 부품의 수도 증가하게 되었으며, 더불어 시스템의 개발비용뿐만 아니라 운영유지비용도 점차 증가하고 있다. 따라서 시스템의 개발초기부터 지원성, 운영환경, 비용 제약하에서 높은 성능을 가진 시스템을 설계하고 개발하는 것이 중요하다. 그러나 많은 부품으로 구성되고 복잡한 구조를 가진

시스템의 성능을 정량적으로 나타내고 이를 설계에 반영하는 것은 매우 어렵다. RAM(reliability, availability and maintainability)은 시스템의 성능을 정량적으로 평가하는 중요한 척도 중 하나로 신뢰도, 가용도 그리고 정비도를 일컫는 말이다. 신뢰도란 시스템, 기기 및 부품 등이 주어진 사용조건에서 규정된 시간에 고장 없이 정해진 기능을 수행할 수 있는 확률을 나타내며, 가용도는 시스템이 어느 특정한 시점에서 요구되는 기능을 수행할 수 있도록 가동 가능상태에 있을 확률로써, 신뢰도 및 정비도를 기반으로 하여 산출되는 시스템의 운용성능을 평가하는 척도이다. 그리고 정비도는 주어진 조건에서 지정된 기간 내에 시스템의 성능이 규정된 상태로 복구할 수 있는 확률이다.

시스템 개발에 있어서 RAM 목표값 설정은 설계관점에서 시스템이 달성해야 할 목표치를 제시하는 개발의 기준이 되는 요소이기 때문에 RAM

<sup>§</sup> 이 논문은 2011년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계 학술대회(2011. 5. 19.-20., 서울과학기술대) 발표논문임

<sup>†</sup> Corresponding Author, [wonyun@pusan.ac.kr](mailto:wonyun@pusan.ac.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

목표값 설정을 위한 업무를 설계단계에서부터 중점적으로 수행하여 기술수준 및 비용 등의 요구사항을 설계에 반영시키고, 모든 예측 가능한 잠재적 고장의 영향을 최소화하여 고장 발생에 대한 대비책을 준비하는 것이 중요하다. 최근 환경 친화적 수송수단으로 주목 받고 있는 철도차량 역시 국내외의 철도운영사에서는 높은 품질의 철도차량을 획득하고자 구매사양서에 정량적 RAM 요구사항을 포함하여 차량제작사에 제시하고 있다. 철도차량의 정량적 RAM은 철도차량의 서비스 품질을 나타내는 중요한 척도로 1999년에 유럽 전기기술 표준화 위원회(CELELEC)는 철도 RAMS의 유럽 규격인 EN50126을 발간하였으며, 2006년에는 EN50126을 철도차량 RAM에 적용하기 위한 가이드라인으로 기술보고서 CLC/TR 50126-3<sup>(1)</sup>을 발표하였다. 정인수 등<sup>(2,3)</sup>은 체계적인 절차에 따른 철도차량의 RAM 목표값 설정을 위해 철도차량의 구매사양서에 포함되어야 할 RAM 특성값에 대해 신뢰도, 가용도, 정비도 측면에서 다양한 척도를 제안했다. 그리고 Eberlein과 Hofer<sup>(4)</sup>는 최근 개발되는 철도차량의 가용도를 고유가용도, 성취가용도 그리고 운영가용도별로 평균 가용도 수준을 제시하였으며, 운영가용도의 경우 88.5~93.5%로 제시하였다.

한편 시스템의 신뢰도 설계를 위한 최적화 연구도 많이 진행되었는데, Blischke와 Murthy<sup>(5)</sup>는 시스템 목표신뢰도를 만족하기 위해 시스템을 구성하고 있는 구성품의 신뢰도 할당 문제에서 AGREE, ARINC 등과 같은 전통적인 신뢰도 할당 방법을 소개하였다. 그리고 Kuo 등<sup>(6)</sup>은 시스템의 각 하위 부품에 최적의 신뢰도 중복할당을 위하여 휴리스틱 기법을 적용하는 방법을 연구하였으며, Gen과 Kim<sup>(7)</sup>은 중복구조 시스템과 다단계 직렬 시스템의 신뢰도를 설정하기 위해서 하나 또는 두 개 이상의 목적함수를 가지는 문제에 대하여 유전자 알고리즘을 이용하여 부품의 최적 신뢰도를 결정하는 연구를 수행하였다. Painton과 Campbell<sup>(8,9)</sup>은 사무용 컴퓨터를 대상으로 각 구성품에 사용 가능한 비용 제약하에서 가지고 있는 사무용 컴퓨터의 신뢰도를 최적화하는 문제를 해결하기 위하여 유전자 알고리즘을 이용하였다.

많은 연구들이 직렬, 병렬, k-out-of-n 구조, consecutive k-out-of-n 구조 등과 같은 다양한 신뢰성 구조에서 구성품의 목표신뢰도 설정 또는 구성품의 중복구조 설계 등을 통한 시스템의 신뢰도 설계에 대해 연구하였다. 그러나 대부분의 연구들

은 다양한 종류의 고장분포 중에서 지수분포만을 고려하거나 또는 정비지연시간을 상수로 고려하는 등 다양한 가정을 바탕으로 한 한정된 문제에 대해 연구하였다. 복잡한 현실 상황에 근접한 형태로 모형화하여 시스템과 구성품의 RAM 성능을 예측 및 분석하기 위해서는 시물레이션에 의한 접근이 유용하다.

시물레이션을 이용한 시스템의 RAM 성능 분석 연구로는 Yun 등<sup>(10)</sup>은 다기능 시스템의 구성요소를 임무, 기능 그리고 요소로 정의하였다. 그리고 시물레이션을 이용하여 다기능 시스템의 RAM 성능을 예측하고 분석하는 기법을 연구하였다. 정일환과 박삼준<sup>(11)</sup>은 시물레이션을 이용하여 효과적으로 무기체계의 RAM 성능 분석을 위해 필요한 신뢰성, 정비성 그리고 유지보수체계별 시물레이션의 입력정보 분석과 AvSim, BlockSim, OpSim 등 상용 RAM 시물레이션 S/W의 성능을 비교 분석하였다. 그리고 Marquez 등<sup>(12)</sup>은 몬테카를로 시물레이션을 이용하여 시스템의 가용도와 신뢰도를 산출하는 기법을 제시하였고, Landers 등<sup>(13)</sup>은 SIMENT를 이용하여 F17 전투기의 음성교신 시스템의 임무신뢰도를 예측하였다.

본 논문에서는 다기능 시스템을 구성하는 최하위 구성품을 대상으로, 개발기준인 시스템의 목표 가용도를 만족하는 구성품의 MTBF(mean time between failure)와 MTTR(mean time to repair)을 결정하고자 한다. 구성품이 가질 수 있는 MTBF와 MTTR의 대안생성을 위해 휴리스틱 기법을 제시하며, 대안의 시스템 가용도와 수명주기비용은 시물레이션을 이용하여 평가한다.

## 2. 다기능 시스템

항공기, 철도차량, 냉장고, 에어컨 등과 같이 하나의 시스템이 여러 가지 기능을 수행하는 시스템을 다기능 시스템(multi-functional system)이라고 정의한다. 그리고 다기능 시스템을 구성하는 요소로는 시스템(system), 임무(mission), 기능(function) 그리고 요소(element)가 있다. 시스템은 현재 분석하고자 하는 대상이며, 임무는 시스템의 사용목적으로 하나 이상의 기능들이 수행됨으로써 완료된다. 기능은 임무가 수행되기 위한 활동으로 하나의 기능이 수행되기 위해서는 하나 이상의 요소들의 작동이 필요하다. 요소는 실제 물리적 고장과 정비가 이루어지는 시스템의 최하위 구성품이다. 다기능 시스템의 임무는 하나 이상의 기능들을 필요로 하고, 기능들은 실제 시스템을 구성하고 있는 일

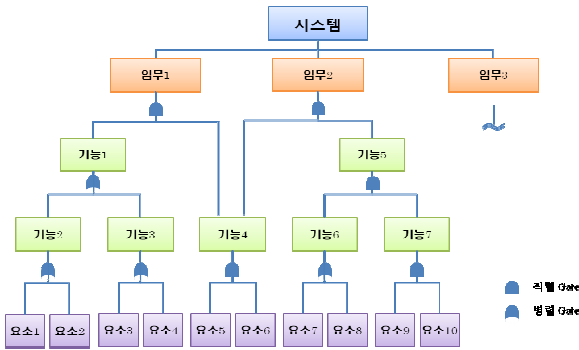


Fig. 1 An example of structure of multi-functional system

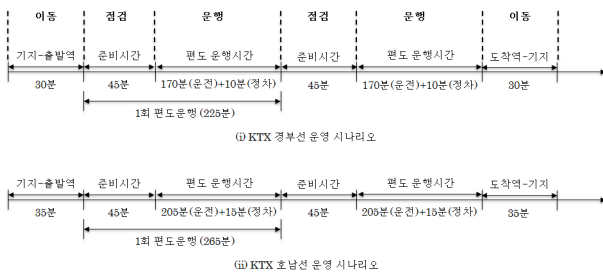


Fig. 2 The operational scenario of KTX

부 또는 모든 구성품이 작동됨으로써 수행된다.<sup>(10)</sup> 그리고 다기능 시스템의 구조에서 시스템, 임무, 기능 그리고 요소들은 계층구조를 이루고 있으며, Gate 를 이용하여 요소들간 또는 기능들간, 요소와 기능 그리고 기능과 임무의 복잡한 신뢰성 구조를 쉽게 표현할 수 있으며 Fig. 1 은 하나의 예다.

철도차량 역시 다기능 시스템 중 하나로 국내에서 운행되고 있는 고속철도차량인 KTX 는 검수 리스트 분류를 기준으로 크게 차체장치, 전기장치, 공압제동장치, 기계장치 그리고 공기조화장치로 구성되어 있으며, 각 하위 시스템은 다시 공압회로, 배터리, 차량 연결 케이블 등 많은 구성품들이 복잡한 구조로 구성되어 있다. KTX 의 임무는 KTX 의 운영시나리오의 분석을 통해서 정의할 수 있으며, 현재 KTX 가 운행하고 있는 노선 중에서 경부선(서울-부산), 호남선(서울-목포)의 운영형태를 분석하여 Fig. 2 와 같이 KTX 의 임무와 노선별 임무의 수행시간을 파악하였다.<sup>(14)</sup> KTX 의 운영시나리오를 구성하는 임무는 이동, 점검, 운행이라는 것을 알 수 있으며, 이러한 임무들이 완료되기 위해 감속, 제동, 냉각 등과 같은 기능이 수행되어야 한다.

### 3. RAM 목표값 설정

#### 3.1 다기능 시스템의 RAM 목표값 설정

일반적으로 시스템 가용도를 산출하는 식은 다

음과 같다.

$$A = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (1)$$

where

MUT: Mean Up Time

MDT: Mean Down Time

시스템 운영의 가정사항에 따라 식 (1)을 이용하여 고유가용도(inherence availability), 성취가용도(achieved availability) 그리고 운용가용도(operational availability)를 계산할 수 있다. 고유가용도를 계산할 때는 고장정비, 그리고 성취가용도는 예방정비를 같이 고려하여 MUT 와 MDT 를 계산한다. 그러나 운용가용도의 경우 시스템의 운영환경을 고려해야 하며, MDT 를 계산할 때 예비품 부족, 정비지연시간 등 행정 및 군수지연시간(administrative and logistics delay times)이 포함된다. 따라서 개발기준에 따라 설정된 목표가용도를 만족하는 시스템을 개발하기 위해서는 적절한 수준의 구성품의 신뢰도와 정비도를 결정하는 것이 중요하다. 그러나 구성품의 신뢰도와 정비도를 결정할 때 현재 보유한 개발기술의 한계, 기술연구와 유지보수체계 운영 등에 소요되는 비용제약으로 인한 신뢰도와 정비도의 개선한계를 고려해야 한다.

본 논문에서는 대안을 평가할 때 시뮬레이션을 이용하여 시스템 가용도와 수명주기비용을 계산한다. 수명주기비용은 크게 초기투자비용과 유지보수비용으로 나눌 수 있다. 먼저 초기투자비용은 시스템의 개발단계에서 신뢰성이 높은 시스템을 개발하기 위해 필요한 기술연구 수행과 관련된 비용을 말한다. 신뢰성 높은 시스템은 고장발생이 적으므로 수리비용이 줄어드는 반면 시스템을 구성하는 구성품의 첨단화로 인한 고가화로 1 회 정비 수행 시 수리단가는 높아진다. 그리고 유지보수비용은 고장난 시스템의 기능을 복구하기 위해 필요한 예비품 구입, 정비원 및 장비의 운영, 시설물 설치 등 유지보수체계의 운영과 관련된 비용으로 빠른 시간에 시스템의 기능을 복구하기 위해서는 보다 많은 구입비용, 보관비용, 설치 및 운영비용 등의 투자비용이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 시스템의 수명주기비용으로 식 (2)와 같이 연간 구성품의 신뢰도와 정비도 개선에 따른 개발비용, 투자비용 그리고 수리비용을 고려하고 시뮬레이션을 이용하여 계산한다.

$$TC = \sum_{i=1}^n \left\{ \left( C_i \times \frac{F_i}{L} \right) + (DC_i + IC_i) \times \frac{r \times (1+r)^L}{(1+r)^L - 1} \right\} \quad (2)$$

where

- $i$  : 구성품 인덱스
- $n$  : 총 구성품의 수
- $L$  : 시스템의 수명주기
- $C_i$  : 구성품  $i$ 의 수리비용(Repair cost)
- $F_i$  : 구성품  $i$ 의 고장 횟수
- $DC_i$  : 구성품  $i$ 의 개발비용(Development cost)
- $IC_i$  : 구성품  $i$ 의 투자비용(Investment cost)
- $TC$  : 시스템의 연간 수명주기비용
- $r$  : 이자율

### 3.2 RAM 목표값 설정 흐름

다기능 시스템의 RAM 목표값 설정을 위한 전반적인 절차는 Fig. 3 과 같다. 먼저 각 구성품의 MTBF 와 MTTR 의 초기 기준값을 입력하고, 목표 가용도를 설정한다. 그리고 휴리스틱 기법을 통해 목표가용도를 만족하는 새로운 대안을 생성하고, 시뮬레이션으로 대안의 시스템 가용도와 수명주기 비용을 계산한다. 대안의 시스템 가용도가 목표가용도를 만족하면 현재 대안이 선택되고, 만족하지 못하는 경우 위의 절차를 반복한다.

### 3.3 휴리스틱 기법

본 논문에서는 다기능 시스템의 목표가용도를 만족하는 구성품의 MTBF, MTTR 의 대안을 생성하기 위해 휴리스틱 기법을 제안한다. 휴리스틱 기법에 사용되는 매개변수와 기호는 Table 1 과 같이 정의한다. 목표가용도를 만족하는 구성품의 MTBF 와 MTTR 의 대안을 생성하기 위해 개선단위( $R_1, R_2$ )와 휴리스틱 절차 수행 중 효과적으로 구성품의 MTBF 와 MTTR 개선시키기 위해 가용도 및 수명주기비용의 변화 비율( $\frac{\Delta A}{\Delta C}$ )을 고려하였다. 그리고 휴리스틱은 대안의 시스템 가용도가 변화의 허용치( $\epsilon$ )를 고려한 목표가용도 범위를 만족하면 종료한다.

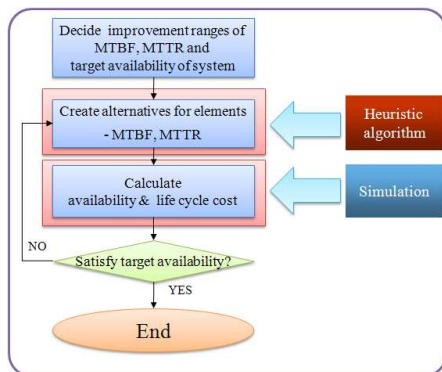


Fig. 3 RAM design procedure

본 논문에서 제안하는 휴리스틱 기법 절차는 다음과 같다.

- 1단계. 구성품의 MTBF와 MTTR의 초기 기준값을 설정하고, 초기 기준값을 현재 대안  $k$ 로 설정한다.
- 2단계. 구성품의 MTBF와 MTTR의 개선한계 ( $R_1, R_2$ )와 목표가용도  $A_T$ 를 설정한다.
- 3단계. 시뮬레이션을 수행하여 현재 대안  $k$ 의 시스템의 가용도  $A_k$ 를 구한다.
- 4단계. 목표가용도  $A_T$ 와 현재 대안  $k$ 의 시스템 가용도  $A_k$ 를 비교한다.
  - 4-1. 만약  $A_T - \epsilon \leq A_k \leq A_T + \epsilon$  인 경우 현재 대안이 목표가용도를 만족하는 대안으로 선택되고 종료를 한다.
  - 4-2. 만약  $A_k < A_T - \epsilon$  인 경우 현재 대안  $k$ 의 시스템 가용도  $A_k$ 를 높이기 위해 모든 구성품의 MTBF를  $R_1$  만큼 증가시키고, MTTR을  $R_2$  만큼 감소시킨 후 현재 대안  $k$ 로 설정한다. 그리고 단계 3으로 간다.
  - 4-3. 만약  $A_k > A_T + \epsilon$  인 경우 현재 대안  $k$ 의 시스템 가용도  $A_k$ 를 낮추기 위해 모든 구성품의 MTBF를  $R_1 \times \alpha_1$  만큼 감소시키고, MTTR을  $R_2 \times \alpha_2$  만큼 증가시킨 후 현재 대안  $k$ 로 설정한다.
    - 4-3-1. 시뮬레이션을 이용하여 대안  $k$ 의 시스템 가용도  $A_k$ 를 계산한다.

Table 1 Notation for heuristic

기호	정의
$R_1$	MTBF의 개선단위
$R_2$	MTTR의 개선단위
$\epsilon$	변화의 허용치
$k$	현재 대안의 인덱스
$A_T$	시스템의 목표가용도
$A_k$	대안 $k$ 의 시스템 가용도
$\Delta A$	가용도의 변화량
$\Delta C$	수명주기비용의 변화량
$\alpha_1$	MTBF의 변화 비율
$\alpha_2$	MTTR의 변화 비율
$L_1$	MTBF의 개선한계
$L_2$	MTTR의 개선한계

4-3-2. 만약  $A_T - \epsilon \leq A_k \leq A_T + \epsilon$  이라면, 현재 대안이 선택되고 종료한다.

4-3-3. 만약  $A_k < A_T - \epsilon$  이면,  $\frac{\Delta A}{\Delta C}$  가 가장 큰 구성품의 MTBF를  $R_1 \times \alpha_1$  만큼 증가, MTTR을  $R_2 \times \alpha_2$  만큼 감소시키고 현재 대안  $k$  로 설정한다. 그리고 4-3-1로 이동한다.

4-3-4. 만약  $A_k > A_T + \epsilon$  이면, 단계 4-3 으로 간다.

### 3.4 시뮬레이션 모델

본 논문에서 시스템의 가용도와 수명주기비용 계산에 사용된 시뮬레이션은 객체지향 설계에 따라 개발하였으며, 시스템 내에서 존재하는 객체들의 활동을 중심으로 시뮬레이션 운영 로직을 설계하였다. 시뮬레이션에서 시간이 진행됨에 따라 상태를 변경하면서 활동하는 객체를 프로세스라고 정의하고, 프로세스의 활동과 각 프로세스 사이의 상호작용을 통하여 시뮬레이션이 수행된다.

시뮬레이션이 수행되기 위해서는 각 객체들의 속성값, 변수 그리고 사건이 발생하는 순서를 저장하는 사건목록을 초기화하는 초기화 루틴과 시뮬레이션이 시작되면서 시뮬레이션 수행자를 이용하여 시뮬레이션을 제어하고 시뮬레이션 시간의 증가와 사건목록을 관리하는 제어 루틴이 필요하다. 그리고 시뮬레이션 수행자는 Fig. 4 와 같이 사

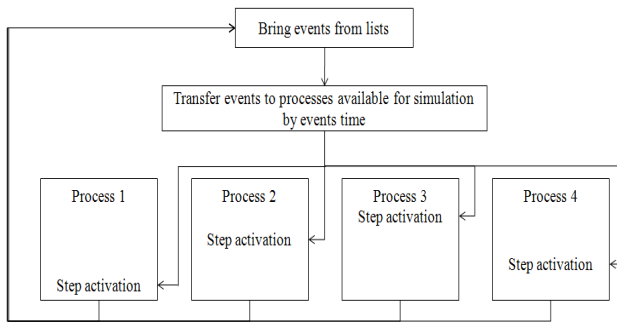


Fig. 4 The role of simulation executive

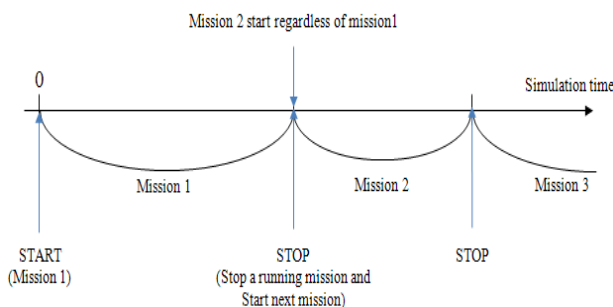


Fig. 5 Rule of mission transition

건목록을 조사하여 적절한 시간에 프로세스들의 수행을 지시한다.

다기능 시스템의 가용도와 수명주기비용을 산출하는 시뮬레이션을 수행하기 위한 가정사항은 다음과 같다.

- 구성품의 고장이 발생하면 즉시 수리하며, 구성품의 실제 사용시간이 구성품의 수명(Age)이다.
- 각 임무는 처음 시작할 때 정해진 시간만큼 수행 후 Fig. 5와 같이 다른 임무로 전이된다.
- 구성품의 수리 완료 시점이 임무 완료시점 보다 이후이고 해당 구성품이 다음 임무에 필요한 구성품이라면, 다음 임무의 고장은 임무 시작과 동시에 발생한다.

## 4. 예제실험

본 절에서는 제안된 휴리스틱 기법을 활용하여 시스템의 목표가용도를 만족하는 구성품의 MTBF와 MTTR 결정하는 예제실험을 수행한다.

예제실험에서는 12 개의 구성품으로 구성된 다기능 시스템을 고려하였으며, Table 2 에서는 시스템이 수행하는 임무와 임무의 수행시간, 각 임무에 필요한 기능 그리고 구성품의 고장 및 수리분포를 보여준다. 그리고 시스템은 시뮬레이션 시간 동안 M1-M2-M3-M4 순서로 임무를 순차적으로 반복 수행한다.

구성품의 MTBF와 MTTR의 개선 한계는 60%, 개선에 따른 개발, 투자 그리고 수리비용의 변화는 2 차 함수를 따른다고 가정한다.<sup>(15)</sup> 휴리스틱 기법에서  $R_1$ 과  $R_2$ 는 10%,  $\epsilon$ 은 0.003 그리고  $\alpha$ 는 0.5로 설정하였다. 그리고 시뮬레이션 수행기간은 10년으로 10회 반복하여 실험하였다.

Fig. 6은 시스템의 목표가용도를 변경하였을 경우 수명주기의 변화를 보여준다. 목표가용도는

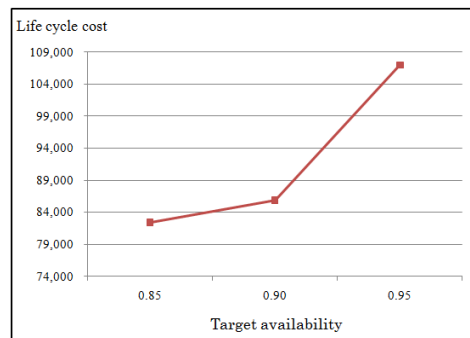


Fig. 6 Life cycle cost for different target availability

Table 2 Input data of system and RAM of components

Mission (Time)	Function	Element	Failure distribution	Repair distribution
M1 (20h)	F <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	Wei(3000, 1.2)	Exp(20)
		E <sub>2</sub>	Exp(2500)	Exp(37)
		E <sub>3</sub>	Wei(1000, 1.8)	Exp(10)
	F <sub>5</sub>	E <sub>12</sub>	Wei(2000, 1.3)	Exp(19)
	F <sub>4</sub>	E <sub>9</sub>	Exp(150)	Exp(8)
		E <sub>10</sub>	Exp(250)	Exp(15)
		E <sub>11</sub>	Wei(250, 1.1)	Exp(10)
M2 (90h)	F <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	Wei(3000, 1.2)	Exp(20)
		E <sub>2</sub>	Exp(2500)	Exp(37)
		E <sub>3</sub>	Wei(1000, 1.8)	Exp(10)
	F <sub>2</sub>	E <sub>4</sub>	Exp(500)	Exp(30)
		E <sub>5</sub>	Wei(500, 1.2)	Exp(12)
		E <sub>6</sub>	Exp(150)	Exp(9)
	F <sub>3</sub>	E <sub>7</sub>	Wei(1000, 1.4)	Exp(20)
		E <sub>8</sub>	Exp(350)	Exp(11)
M3 (80h)	F <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	Wei(3000, 1.2)	Exp(20)
		E <sub>2</sub>	Exp(2500)	Exp(37)
		E <sub>3</sub>	Wei(1000, 1.8)	Exp(10)
	F <sub>2</sub>	E <sub>4</sub>	Exp(500)	Exp(30)
		E <sub>5</sub>	Wei(500, 1.2)	Exp(12)
		E <sub>6</sub>	Exp(150)	Exp(9)
	F <sub>4</sub>	E <sub>9</sub>	Exp(150)	Exp(8)
		E <sub>10</sub>	Exp(250)	Exp(15)
		E <sub>11</sub>	Wei(250, 1.1)	Exp(10)
M4 (100h)	F <sub>2</sub>	E <sub>4</sub>	Exp(500)	Exp(30)
		E <sub>5</sub>	Wei(500, 1.2)	Exp(12)
		E <sub>6</sub>	Exp(150)	Exp(9)
	F <sub>3</sub>	E <sub>7</sub>	Wei(1000, 1.4)	Exp(20)
		E <sub>8</sub>	Exp(350)	Exp(11)

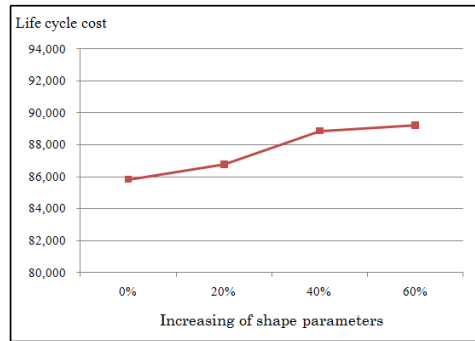


Fig. 7 Life cycle cost for different shape parameters

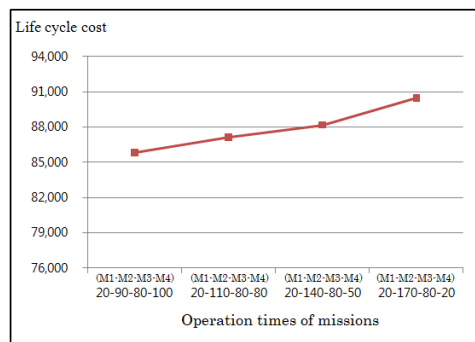


Fig. 8 Life cycle cost for different operation times of M2, M4

를 만족하기 위해 구성품의 MTBF 와 MTTR 이 더 많이 개선되어야 하며 이로 인해 더 많은 비용이 소요되기 때문이다.

다음은 고장분포 중에서 와이블 분포의 형상모수를 20%, 40% 그리고 60% 증가시키면서 수명주기비용을 변화를 분석하였다. Fig. 7 에서 와이블 분포의 형상모수를 증가시킬수록 수명주기비용이 커지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 와이블 분포의 형상모수가 1 인 경우 고장률은 일정하지만, 1 보다 커질수록 고장률함수가 증가하므로, 와이블 분포를 가진 구성품의 고장이 더 많이 발생하기 때문이다. 따라서 목표가용도를 달성하기 위해 더 많은 개선비용이 필요하므로 수명주기비용이 증가한다.

다음은 구성품의 Duty cycle 에 변화를 주어 수명주기비용의 변화를 분석하였다. 먼저 M4 의 수행시간을 100, 800, 50 그리고 20 으로 감소시키고, M2 의 수행시간을 90, 110, 140 그리고 170 으로 증가시켜 E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub> 의 Duty cycle 을 0.66 에서 0.83 까지 증가시켰다. Fig. 8 은 E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub> 의 Duty cycle 이 증가할 수록 수명주기비용이 증가하는 것을 보여준다. 이는 E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub> 이 작동하는 시간이 증가해서 더 많은 고장이 발생하기 때문에 목표가용도를 달성하기 위해 E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub> 의 MTBF 와

0.85, 0.90, 0.95 로 설정하였다. 목표가용도가 높아질수록 수명주기비용이 커지는데 이는 목표가용도

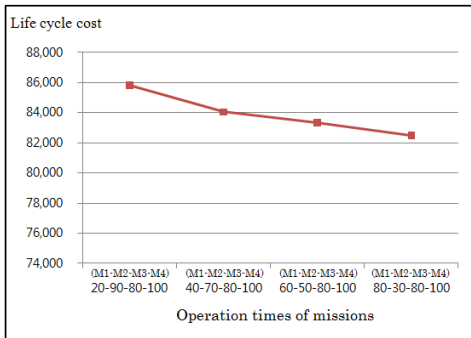


Fig. 9 Life cycle cost for different operation times of M1, M2

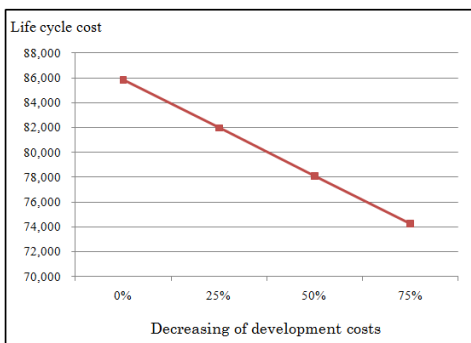


Fig. 10 Life cycle cost for decreasing of development costs

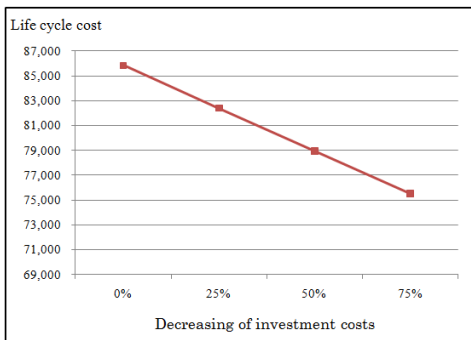


Fig. 11 Life cycle cost for decreasing of investment costs

MTTR 을 개선하기 위해서는 더 많이 비용이 필요하기 때문이다.

Fig. 9 는 M1 의 수행시간을 20 에서 80 으로 증가 시키고, M2 의 수행시간을 90 에서 30 으로 감소시켜  $E_4, E_5, E_6, E_7, E_8$  의 Duty cycle 이 감소하였을 때 수명주기비용이 감소되는 것을 보여준다. 이는 Duty cycle 이  $E_4, E_5, E_6, E_7, E_8$  에 편중되지 않고 모든 구성품의 Duty cycle 이 평균화되었기 때문이다.

다음은 개발비용과 투자비용에 변화를 주어 실험하였다. 먼저 개발비용을 25%, 50% 그리고 75% 감소시켰을 때 수명주기비용의 변화를 관찰하였다. 개발비용은 구성품의 MTBF 의 개선과 관계가 있

으므로 개발비용이 줄어들면 보다 적은 비용으로 구성품의 MTBF 를 개선하여 목표가용도를 만족할 수 있기 때문에 Fig. 10 과 같이 목표가용도 0.90 결과를 기준으로 개발비용이 감소하면 수명주기비용 역시 감소한다.

다음은 투자비용을 25%, 50% 그리고 75% 감소시켰을 때 수명주기비용의 변화를 관찰하였다. 개발비용과 달리 투자비용은 구성품의 MTTR 을 개선하기 위해 소요되는 비용으로, 투자비용이 감소하는 것은 보다 적은 비용으로 구성품의 MTTR 을 개선하여 목표가용도를 만족할 수 있으므로 Fig. 11 과 같이 목표가용도 0.90 결과를 기준으로 투자비용이 감소하면 수명주기비용도 감소한다.

### 5. 결론

본 논문은 철도차량과 같은 다기능 시스템의 목표가용도를 만족하는 구성품의 MTBF 와 MTTR 의 결정하는 방법에 대하여 연구하였다. 다기능 시스템의 구성요소로 시스템, 임무, 기능 그리고 요소를 정의하였고, 목표가용도를 만족하는 구성품의 MTBF 와 MTTR 의 대안을 생성하는 방법으로 휴리스틱 기법을 개발하였다. 대안은 휴리스틱 절차에 따라 기술수준과 비용제약을 고려한 개선범위 내에서 구성품의 MTBF 와 MTTR 을 일정한 단위로 개선시키면서 생성하였으며, 대안의 목표가용도 달성 여부를 판단하기 위해 시뮬레이션을 이용해 시스템 가용도와 수명주기비용을 산출하였다. 그리고 수명주기비용은 구성품의 MTBF 의 개선에 따라 증가하는 수리단가와 개발비용 그리고 MTTR 의 개선에 따라 증가하는 투자비용을 고려하였으며, MTBF 와 MTTR 의 개선 정도에 따라 비용은 2 차 함수를 따른다고 가정하였다. 본 논문에서 제시된 휴리스틱 기법을 적용한 다양한 예제실험을 수행하여 매개변수의 변화에 따른 수명주기비용의 변화를 분석하였다. 향후 메타 휴리스틱과 같은 최적화 알고리즘을 이용하여 시스템 목표가용도를 만족하고 수명주기비용을 최소화하는 최적해를 제시하였을 때 해의 최적화를 보장하는데 비교 척도로 활용 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NO.2010-0025084).

## 참고문헌

- (1) CLC/TR 50126-3, 2006, Guide to the Application of EN50126 for Rolling Stock RAMS.
- (2) Chung, I. S., Lee, K. W. and Kim, J. W., 2008, "A Study on RAMS Parameters in the Procurement Requirement for Rolling Stock," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 11, No. 4, pp. 371~377.
- (3) Chung, I. S., Lee, K. W. and Kim, J. W., 2008, "Study on Setting up the Quantitative RAM Goals for Rolling Stocks," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 11, No. 4, pp. 390~397.
- (4) Eberlein, M. and Hofer, L., 2002 "The Development of Rail Vehicles from the Perspective of greater Availability," *Railway Technical Review-International Journal for Railway Engineers*, No. 2-3, pp. 112~121.
- (5) Blischke, W. R. and Murthy, D. N. P., 2000, *Reliability Modeling, Prediction, and Optimization*, Wiley Interscience, New York.
- (6) Kuo, W., Parasad, V. R., Tillman, F. A. and Hwang, C. L., 2001, *Optimal Reliability Design: Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, New York.
- (7) Gen, M. and Kim, J. R., 1999, "GA-based Reliability Design: State-of-the-art Survey," *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 37, No. 1-2, pp. 151~155.
- (8) Painton, L. and Campbell, J., 1994, "Identification of Components to Optimize Improvements in System Reliability," *Proceedings of the SRA PSAM-II Conference on System-based Methods for the Design and Operation of Technological Systems and Processes*, pp. 10.15~10.20.
- (9) Painton, L. and Campbell, J., 1995, "Genetic Algorithms in Optimization of System Reliability," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 44, No. 2, pp. 172~178.
- (10) Yun, W. Y., Moon, I. K. and Kim, G. R., 2008, "Simulation-based Maintenance Support System for Multi-functional Complex Systems," *Production Planning and Control*, Vol. 19, No. 4, pp. 365~378.
- (11) Chung, I. H. and Park, S. J., 2008, "Effect Analysis of Factors for Improving Accuracy of RAM Simulation in Weapon System," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 11, No. 6, pp. 102~116.
- (12) Marquez, A. C., Heguedas, A. S. and Iung, B., 2005, "Monte Carlo-based Assessment of System Availability. A Case Study for Cogeneration Plants," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 88, No. 3, pp. 273~289.
- (13) Lander, T. L., Taha, H. A. and King, C. L., 1991, "A Reliability Simulation Approach for Use in the Design Process," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 40, No. 2, pp. 177~181.
- (14) Cha, J. H., Chung, I. S., Kim, J. W. and Yu, Y. H., 2009, "The Study on Setting up KTX-II"s RAM Goals for Requirement Train-set," *Proceedings of 2009 Spring Conference of the Korea Society for Railway*, pp. 191~198.
- (15) Alexander, A. J., 1988, *The Cost and Benefits of Reliability in Military Equipment*, The RAND Corporation, Santa Monica.
- (16) IEC62278, 2002, Railway applications-The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS).
- (17) Block, K. C. and Geitner, F. K., 1994, *An Introduction to Machinery Reliability Assessment*, Gulf Publishing Company, Houston.
- (18) Chung, I. H., 2009 "Simulation-based Repair Policy for MIME System," Ph. D Thesis, Pusan National University.
- (19) Rausand, M. and Hoyland, A., 2004, *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications: Second Edition*, Wiley Interscience, New York.
- (20) Seo, S. K., Kim, H. G, Kwon, H. M., Cha, M. S., Yun, W. Y. and Cha, J. H., 2008, *Reliability Engineering*, Kyobo, Seoul.