

# Optimization of the Selective Maintenance under Plural Systems Considering Shortage of Spare Parts and Cannibalization

Jangwon Lee · Suhwan Kim<sup>†</sup>

Department of Defense Science, Korea National Defense University

## 동류전용과 수리부속 부족을 고려한 복수의 시스템에 대한 선택적 정비 최적화

이장원 · 김수환<sup>†</sup>

국방대학교 국방과학학과

This paper addresses the maintenance optimization problem in multi-component systems in which parts are connected in series, carrying out several missions interspersed with scheduled finite breaks. Due to limited time or resources, maintenance actions can be only carried out on a limited set of components. The decision maker then has to decide which components to maintain to ensure a pre-specified performance level during next mission. Most of the existing models in the literature usually assume only one system and enough spare parts. However, there are situations in which maintenance is required for multiple systems of the same type. To overcome this restrictive assumption, this study optimizes the maintenance problem considering the lack of repair parts and cannibalism for many identical systems. This study presents two optimization models with different objectives to solve the problem and analyzes the results so that the decision maker can decide. The results of this study are expected to be used for the maintenance of multiple systems of the same type, such as swarm drones.

**Keywords :** Selective maintenance, Reliability, Preventive maintenance, Optimization

### 1. 서론

군 장비와 항공기, 선박을 포함한 민간의 다양한 장비들에 대해서 임무와 임무 사이 정해진 기간에 다음 임무를 위한 정비작업을 수행한다. 예를 들어 군 장비는 훈련이 끝나고 다음 훈련 전까지 정비작업을 수행하며, 항공기는 비행과 비행 사이 공항에서, 어선은 조업과 조업 사이 항구에서 정비작업을 수행한다. 다음 임무 수행을 위해서는 시스템의 모든 구성요소에 대하여 정비작업을 하는 것이 이상적이지만, 예산, 정비인력 등 제한된 자원과 일정으로

인해 시스템의 모든 구성요소에 대해 정비하는 것이 불가능할 수가 있다. 따라서 제한된 자원을 고려하였을 때, 어떠한 부품에 대해서 정비하는 것이 최적의 방법인지 결정할 필요가 있다. 이러한 문제는 선택적 정비 문제(SMP, selective maintenance problem)로 알려져 있다.

최초의 SMP 연구로는 Rice et al.[27]이 지수분포로 된 수명을 갖는 독립적이고 동일한 구성요소로 구성된 하위 시스템이 있는 직병렬 시스템을 고려하였다. Rice et al.[27]이 SMP를 제시한 이후로 현재까지 SMP에 관한 다양한 연구 문제와 해법이 제시되며 관련 연구가 활발히 진행되었다.

시스템 구성요소가 증가하면서 문제해결을 위한 전체 열거식 방법의 제약을 극복하고자, Rajagopalan and Cassady[26]는 개선된 수치적 해법을 제시하였으며, Lust

Received 2 November 2022; Finally Revised 7 December 2022;  
Accepted 16 December 2022

<sup>†</sup> Corresponding Author : ksuhwan@korea.kr

et al.[20]은 Cassady and Pohl[2]의 직병렬 SMP를 branch-and-bound와 타부서치 알고리즘을 적용한 해법을 제시하였다. Khatab et al.[14]은 Aggrawal[1], Gopal et al.[9]와 Sharma and Venkateswaran[29]에서 제시된 중복할당문제를 적용하여 두 가지의 휴리스틱 기반 해법을 제시하였고, Panday et al.[24]은 미분진화 알고리즘을 적용한 해법을 제시하였다. Dao et al.[5], Khatab et al.[15], Liu et al.[19], Zhu et al.[31] 등은 큰 사이즈의 SMP 문제를 해결하기 위해 유전 알고리즘을 사용하였다.

초기 SMP는 또한 불완전 정비 모델로도 많은 연구가 진행되었다. Zhu et al.[31]은 불완전 정비 모델을 위해 Malik[23]의 노후도 감소 계수 접근법(age reduction coefficient approach)을 사용하였다. Panday et al.[24] 또한 이전 시스템에 대하여 불완전 정비를 고려 SMP를 연구하였다. Lin et al.[17]은 노후도 감소 계수 및 조정 계수가 구성요소 상태에 영향을 미치는 불완전 예방정비 활동을 모델링 하였다.

Panday et al.[25]의 연구에서는 시스템 구성요소의 신뢰도를 향상시키는 다른 수준의 정비방법을 적용하였으며, 불완전 정비의 수준과 정비 활동으로 소모되는 자원의 관계를 제시하였다. Khatab et al.[10]은 불완전 정비의 수준이 확률적일 때의 SMP에 대해 연구했으며, 비선형 및 확률적 최적화 해법을 제시하였다.

Liu et al.[18]은 확률적 정비 기간을 갖는 multi-state-systems(MSS)에 대해 순서 계획 모델(sequence planning model)을 제시하였다. Duan et al.[7]은 확률적 정비결과를 갖는 모델을 제시하였다. Diallo et al.[6]은 복잡하게 연결된 시스템에 대해 두 단계로 이루어진 해법을 제시하였다. Zhao et al.[30]은 정비 기간이 지수분포를 갖는 다중 임무를 갖는 SMP를 제시하였으며, Pandey et al.[25]은 불완전 정비를 고려한 정비 스케줄링 모델을 발전시켰다. Maillart et al.[22]은 다중 임무 SMP에 대해 확률적 역학 프로그램으로 공식화하였다.

Schneider and Cassady[28]는 독립적이며 동일한 시스템으로 이루어진 합대가 순차적 임무를 수행하고 공통된 기지로 복귀하여 선택된 구성요소에 대해 정비하는 SMP를 연구하였다. Maaroufi et al.은 고장 확산 상황 속에서의 SMP를 연구하였다[21]. Khatab et al.[11, 12]은 임무와 정비 기간이 알려진 분포로 확률적일 경우의 SMP를 연구하였다.

시스템 내 구성요소들과 전체 시스템이 두 개 이상의 상태에 있을 수 있는 multi-state-systems(MSS)에 대해서도 Chen et al.[3]이 연구하였다. Khatab and Ait-Kadi[13]는 이를 한 가지 이상의 임무를 수행하는 MSS를 simulated annealing 알고리즘을 사용하여 연구하였다. Liu and Huang[19]은 구성요소가 두 가지 작동상태를 갖고 구성요소의 상태를 중간

수준의 열화 수준으로 만들 수 있는 불완전 정비 MSS를 고려하였다. Pandey et al.[25]은 각 구성요소가 두 개 이상의 상태를 갖는 연속시간 마코프 체인으로 모델링하여 MSS를 연구하였다. Dao and Zuo[4]은 다음 임무의 다양한 부하 상황에서 작동하는 multi-state system의 SMP를 연구하였으며, 부하 의존적인 열화 모델을 제시하였다.

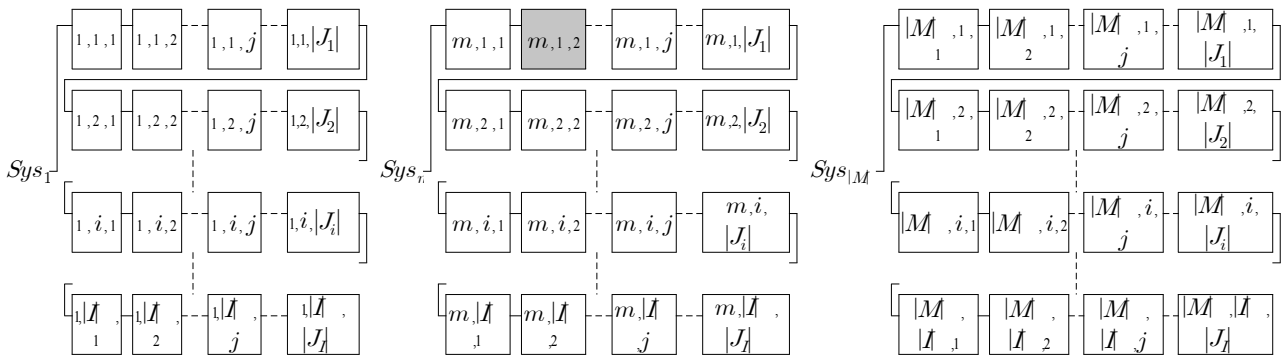
Khatab et al.[16]은 기존 연구가 1명의 정비인력을 가정한 것에서 정비능력에 차이가 존재하는 여러 명의 정비인력을 정비에 할당하는 것에 대하여 최대의 신뢰도 또는 최소 정비비용을 목적식으로 하여 최적화 해법을 제시하였다.

기존 연구들의 주요 한계점으로는 대부분 한 개의 시스템에 대해서만 정비방법을 최적화했다는 것이다. 기존 연구에 따르면, Schneider and Cassady[28]만이 독립적이며 동일한 시스템으로 구성된 함대(fleet)를 모델링 하여, 다수의 시스템을 다루었다. 하지만 복수의 시스템 정비시 현실 세계에서 빈번히 발생하고 주요 이슈가 되는 수리부속 부족과 이를 해결하려는 방법의 하나인 동류전용을 고려하지 않았다.

따라서 복수의 시스템 정비를 위한 수리부속 부족과 동류전용을 고려한 SMP에 관해 연구할 필요가 있다. 최근 활발히 연구 및 도입되고 있는 군집드론 및 대형 물류창고의 물류 이동용 로봇 등은 독립적인 다수의 시스템으로 이루어져 있으나 이의 최적 정비방안 등에 관한 연구는 이루어지지 않았다. 이러한 연구는 군에서도 전시 대규모의 장비피해시 또는 훈련간 최적의 정비방안을 도출하는데 활용될 수 있다. 전시 등 원활한 보급이 제한된 상황에서 수리부속 부족이 정비에 큰 제약이 되는 상황을 가정할 수 있으며, 이 경우 동류전용을 적극적으로 고려하여야 하나, 정비대상의 수가 늘어나 경우의 수가 많다면 최적의 정비방법을 결정하는 것은 어려운 문제가 될 것이다.

또한, SMP의 기존연구는 서브시스템 내의 구성요소들이 병렬로 연결된 것을 가정하였으나, 현실 세계에는 병렬로 연결된 구성요소가 드물다는 점을 고려하여 본 연구에서는 서브시스템 내의 구성요소들이 직렬로 연결된 것으로 가정한다. 여객기의 엔진과 같이 시스템이 병렬로 연결된 구성요소를 갖는다 하더라도, 엔진 중 한 개가 고장이 발생하면 정상적인 임무를 수행하지 못하고 긴급히 착륙하여야 하므로, 본 연구에서는 현실을 반영하여 직렬로 연결된 시스템만을 다룬다. 따라서 본 연구에서는 기존연구들의 제한적인 가정사항을 완화하여 새로운 SMP를 모델링하였으며, 이의 최적화 해법을 제시한다.

본 연구의 기여점으로 첫째, 본 연구에서는 기존연구의 단일 시스템에서 벗어나 복수의 시스템을 다루며, 복수의 시스템을 정비하면서 발생하는 요소인 수리부속 부족과 동류전용을 고려한다. 둘째, 기존의 직병렬혼합 시스템이



<Figure 1> Systems Structure

아닌 보다 현실적인 직렬로만 연결된 시스템을 다룬다. 셋째, 복수의 시스템 정비 시 고려할 수 있는 기준신뢰도와 정비 가능 수량의 관계를 바탕으로 두 가지의 모델을 구축하여, 이의 차이에 대해 민감도 분석을 하여 그 의미를 분석한다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 제2장에서는 문제 정의로 시스템 설명, 주요가정, 정비방법 및 신뢰도 계산에 대하여 다룬다. 제3장에서는 혼합 정수 비선형계획법(MINLP, mixed integer non-linear programming)으로 문제를 모델링 한 후, 제4장과 제5장에서 이의 실험결과에 대해서 분석한다. 마지막으로 제6장에서는 본 연구의 결론과 향후 연구에 대해 논의한다.

## 2. 문제 정의

### 2.1 시스템 설명

본 연구에서 다루는 시스템들은 <Figure 1>과 같이 동일하고 독립적인 시스템으로 구성된다. 각 시스템은 직렬로 연결된 상이한 서브시스템으로 구성되고, 각 서브시스템은 동일한 구성요소들이 직렬로 연결되어 있다. <Figure 1> 시스템 구조도에서 여러 구성요소 중 회색 음영으로 표시한 (m, 1, 2)는 m번째 시스템의, 첫 번째 서브시스템의 두 번째 구성요소를 의미한다. M, I, J와 같은 Sets에 대한 정의는 3.1절에서 상세히 정의하도록 하겠다.

같은 인덱스 상의 서브시스템 내의 구성요소들은 상호 호환이 가능하며, 자동차의 타이어와 같이 4개의 동일한 부품이 있는 경우 다른 자동차에 이식하여 사용할 수 있는 것을 반영한 구조이다.

본 연구의 주요가정 사항들은 다음과 같다.

- 1) 시스템들은  $M$ 개의 독립적이고 동일한 시스템으로 구성되어 있다.
- 2) 각 시스템은  $I$ 개의 서브시스템으로 구성되고, 각 서

브시스템은  $|J_i|$ 개의 구성요소로 구성된다.

- 3) 각 구성요소는 복구 가능한 정상/고장의 상태를 갖는다.
- 4) 본 연구에서 사용하는 신뢰도 함수는 와이블 분포이며, 고장분포는 *shape* 파라미터  $\beta$ , *scale* 파라미터  $\eta$ 로 표현한다.
- 5) 정비 기간 동안 시스템 구성요소는 노화되지 않는다.
- 6) 임무 중 정비 활동은 불가능하며, 정비 활동은 정비 기간에만 가능하다.
- 7) 시스템들은 막 임무를 마치고 기계화된 기간 정비를 받는다고 가정한다.
- 8) 시스템들은 계획된 정비를 마치고 다음 임무를 수행한다고 가정한다.
- 9) 각 구성요소는 신제품으로의 교환정비 또는 다른 시스템으로부터 같은 인덱스의 서브시스템 내 정상상태의 호환되는 구성요소를 이식받는 동류전용을 받을 수 있다.
- 10) 정상작동하는 수리부속은 같은 인덱스의 서브시스템 내의 수리부속을 정비하기 위해 동류전용을 통해 부품으로 사용될 수 있다.
- 11) 정비요원은 시스템의 여러 구성요소를 동시에 작업할 수 있다.
- 12) 필요한 모든 제한된 자원(수리부속, 정비인력)은 필요할 때 사용 가능하며, 제한 시에는 파라미터를 통해 적용한다.

시스템의 정비방법 및 신뢰도 계산은 2.2절 및 2.3절을 통해 상세히 정의한다.

### 2.2 정비방법

시스템의 구성요소의 노후도는 초기 부품 노후도와 정비 후 부품 노후도로 구분되며, 정상 또는 고장 이진 변수로 표시되는 작동상태는 시스템의 구성요소의 정비 전 초기 작동여부와 정비 후 작동여부의 이진변수로 나타낸다. 이진

변수는 고장인 경우 0, 정상작동하는 경우 1을 할당한다.

구성요소에 대해 여유 수리부속이 있는 경우 신제품으로의 교체가 가능하며, 이때 정비 후 부품 노후도는 0이 되며, 이를 신제품교체(replaced with new)로 정의한다. 반면, 여유 수리부속이 제한되는 경우 다른 시스템의 동일 인덱스 서브시스템의 정상 작동하는 구성요소를 이식하는 정비가 가능하며 이를 동류전용(replaced with used)으로 정의한다. 반면 이식된 부품은 동류폐기(cannibalized)로 정의한다. 동류전용으로 복구 시에는 기존 구성요소의 노후도 감소도가 특정 비율을 따른다고 가정한다. 동류폐기와 동류전용은 연속된 하나의 정비로 간주한다. 따라서 한 명의 정비요원에 의해 동류폐기의 종료와 동시에 동류전용이 시작된다.

시스템의 각 구성요소에 대해 정비방법은 위 3가지 방법 중 최대 한 가지만 적용할 수 있다. 동류전용으로 구성요소를 복구하고 동일 구성요소를 신제품으로 교체하는 경우를 예로 들면, 동류전용 없이 신제품으로만 교체하는 것이 불필요한 정비 없이 동일한 정비효과를 내기 때문이다.

한 시스템에 대해서 다수의 정비 인원이 동시에 정비작업을 진행할 수 있다. 이는 비행기를 정비하는 경우 한 정비 인원이 비행기의 조종실을 정비하고, 동시에 다른 정비 인원은 비행기의 엔진 또는 날개를 정비할 수 있는 것을 반영한 것이다. 따라서 각 정비요원은 자신에게 주어진 총 정비시간만 준수하면 된다.

## 2.3 시스템의 신뢰도 계산

다음 임무를 성공적으로 시스템이 수행할 확률을 구하기 위해서는 먼저, 각 구성요소  $a$ 의 다음 임무 수행을 위한 신뢰도를 계산하여야 한다. 정상작동하는 구성요소  $a$ 에 대해,  $r_a^c(P_{ops} | w_a)$ 를 다음 임무 수행 기간인  $P_{ops}$  동안 생존할 조건부 확률로 정의한다. 이 조건부 신뢰도는 정비 후 노후도( $w_a$ )와 다음 작전 기간( $P_{ops}$ )을 고려하여 식 (1)과 같이 정의한다.

$$r_a^c(P_{ops} | w_a) = \frac{r_a(w_a + P_{ops})}{r_a(w_a)} \quad (1)$$

시스템의 조건부 신뢰도  $r$ 은 시스템의 각 서브시스템과 서브시스템내의 구성요소들의 직병렬 연결구조에 따라 결정된다. 본 연구에서는 <Figure 1>와 같이 모든 서브시스템과 구성요소들이 직렬로 연결되어 있으므로, 각 구성요소의 조건부 신뢰도의 곱으로 정의한다.

$$r = \prod r_a^c(P_{ops} | w_a) \quad (2)$$

## 3. 최적화 모델링

최적화 모델로 모델-1과 모델-2의 두 가지의 다른 목적식을 갖는 모델을 작성한다. 모델-1은 기준신뢰도를 만족하는 시스템의 수를 최대화하면서, 조건을 만족하는 시스템의 수가 같은 경우 신뢰도를 최대화하도록 하였고, 모델-2는 작전 요구 최소 시스템 수를 만족하는 가운데 기준신뢰도를 최대화하도록 한다. 두 가지의 다른 모델의 차이에 대해서는 4.4절과 5.4절 모델-1과 모델-2의 민감도 분석에서 자세히 분석한다.

### 3.1 모델-1

모델-1은 기준신뢰도를 만족하는 시스템의 수와 신뢰도를 최대화한다.

모델에서 사용하는 인덱스(Indices) 및 집합(Sets), 매개변수(Parameters) 및 결정변수(Decision variables)는 다음과 같다.

인덱스(Indices) 및 집합(Sets)

$m \in M$ : 시스템의 집합,  $M = \{1, \dots, |M|\}$

$i \in I$ : 서브시스템의 집합,  $I = \{1, \dots, |I|\}$

$j \in J_i$ : 서브시스템  $i \in I$ 의 구성요소 집합,

$J_i = \{1, \dots, |J_i|\}$

$k \in K$ : 정비요원의 집합,  $K = \{1, \dots, |K|\}$

시스템, 서브시스템, 구성요소 및 정비요원의 수는 각 집합의 크기(Cardinality)로 정의한다.

매개변수(Parameters)

$E_i$ : 서브시스템  $i$ 의 여유 수리부속 수,  $i \in I$

$T_{mij}$ :  $m$ 번째 시스템,  $i$ 번째 서브시스템,

$j$ 번째 부품교체 시간,

$m \in M, i \in I, j \in J_i$

$H_{mij}$ :  $m$ 번째 시스템,  $i$ 번째 서브시스템,

$j$ 번째 부품 동류전용 시간,

$m \in M, i \in I, j \in J_i$

$age_{mij}$ :  $m$ 번째 시스템,  $i$ 번째 서브시스템,

$j$ 번째 부품의 초기 부품 노후도,

$m \in M, i \in I, j \in J_i$

$state_{mij}$ :  $m$ 번째 시스템,  $i$ 번째 서브시스템,

$j$ 번째 부품의 초기 부품 상태,

정상작동 시 1 / 0, otherwise,

$m \in M, i \in I, j \in J_i$

$\delta_{mij}$ :  $m$ 번째 시스템,  $i$ 번째 서브시스템,

$j$ 번째 부품 동류 전용 시 노후감소도,

$m \in M, i \in I, j \in J_i$

$T_{maint}$ : 정비시간

$R_0$ : 기준신뢰도(for model-1)

$R_m$ : 임무 요구 시스템 수(for model-2)

$P_{ops}$ : 다음 임무 기간

결정변수(Decision variables)

$w_{mij}$ : 구성요소의 정비 후 노후도,

$$w_{mij} \geq 0, m \in M, i \in I, j \in J_i$$

$z_{mij}$ : 구성요소의 정비 후 부품 상태,

정상작동 시 1 / 0, otherwise,

$$m \in M, i \in I, j \in J_i$$

$x_m$ : 시스템 m이 기준신뢰도,

$$R_0 \text{ 이상 시 } 1 / 0, \text{ otherwise, } m \in M$$

$r_m$ : 시스템 m의 다음 임무에 대한 조건부

신뢰도,  $0 \leq r_m \leq 1, m \in M$

$y_{mijk}$ : 정비요원 k에 의해 신품으로

교체시 1 / 0, otherwise,

$$m \in M, i \in I, j \in J_i, k \in K$$

$v_{mijk}$ : 정비요원 k에 의해 동류전용시

1 / 0, otherwise,

$$m \in M, i \in I, j \in J_i, k \in K$$

$v'_{mijk}$ : 정비요원 k에 의해 동류폐기시

1 / 0, otherwise,

$$m \in M, i \in I, j \in J_i, k \in K$$

$r_{mij}^c(P_{ops} | w_{mij})$ : 구성요소의 다음 임무 기간에 대한

조건부 신뢰도,

$$0 \leq r_{mij}^c(P_{ops} | w_{mij}) \leq 1,$$

$$m \in M, i \in I, j \in J_i$$

$R_0$ : 기준신뢰도(for model-2)

최적화 모델-1의 목적식과 제약식은 식 (3)~식 (13)과 같다.

$$\text{Max } Z = \sum_{m \in M} (r_m + |M|x_m)x_m \quad (3)$$

subject to:

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} (T_{mij} y_{mijk} + H_{mij} v_{mijk}) \leq T_{maint} \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} y_{mijk} \leq E_i \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{j \in J_i} [v_{mijk} - v'_{mijk}] = 0 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} v'_{mijk} \leq state_{mij} \quad \forall m \in M, i \in I, j \in J_i \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} [y_{mijk} + v_{mijk} + v'_{mijk}] \leq 1 \quad (8)$$

$$\forall m \in M, i \in I, j \in J_i$$

$$w_{mij} = age_{mij} (1 - \sum_{k \in K} y_{mijk}) (1 - \delta_{mij} \sum_{k \in K} v_{mijk}) \quad (9)$$

$$\forall m \in M, i \in I, j \in J_i$$

$$z_{mij} = state_{mij} (1 - \sum_{k \in K} v'_{mijk}) \quad (10)$$

$$+ (1 - state_{mij}) (\sum_{k \in K} y_{mijk} + \sum_{k \in K} v_{mijk})$$

$$\forall m \in M, i \in I, j \in J_i$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} (y_{mijk} + v_{mijk}) \leq bigM * x_m \quad (11)$$

$$\forall m \in M$$

$$r_m \geq R_0 x_m \quad \forall m \in M \quad (12)$$

$$r_m = \prod_{i \in I} \prod_{j \in J_i} r_{mij}^c(P_{ops} | w_{mij}) z_{mij} \quad \forall m \in M \quad (13)$$

$$x_m, y_{mijk}, v_{mijk}, v'_{mijk}, z_{mij} \in \{0, 1\},$$

$$0 \leq r_{mij}^c(P_{ops} | w_{mij}) \leq 1, w_{mij}, r_m \geq 0$$

$$\forall m \in M, i \in I, j \in J_i, k \in K$$

목적식 식 (3)은 기준신뢰도( $R_0$ ) 이상의 시스템 수 ( $\sum x_m$ )와 시스템 전체의 신뢰도( $\sum r_m$ )를 최대화하는 것이다. 기준신뢰도를 적용하므로,  $\sum x_m$ 을 최대화 하는 것이  $\sum r_m$  보다 우선시 한다.  $\sum x_m$ 만 고려할 경우,  $\sum x_m$ 이 동일한 다수의 해 중에서  $\sum r_m$ 를 최대화하지 못한다.  $\sum r_m$ 와  $\sum (r_m + x_m)$ 와 같은 목적식은 기준신뢰도에 미달하는 시스템의 신뢰도를 포함하게 된다. 기준신뢰도에 미달하는 시스템은 고려하지 않아야 하므로 목적식에  $x_m$ 을 곱해주어 목적식을  $\sum (r_m + x_m)x_m$ 와 같이 정의하는 경우,  $\sum x_m$ 이 적도라도  $\sum r_m$ 의 값으로 목적값이 더 큰 경우가 있을 수 있다. 따라서 기준신뢰도 이상의 장비를 최대화하기 위해  $\sum x_m$ 에 전체 시스템의 수(|M|)만큼 가중치를 부여한다. 따라서 목적식 식 (3)은  $\sum (r_m + |M|x_m)x_m$ 와 같이 정의한다. 이 가중치의 의미는 4.4절 및 4.5절 민감도 분석에서 자세히 다룬다.

식 (4)는 각 정비요원은 주어진 정비 시간( $T_{maint}$ )을 준수하여야 한다는 것이다. 동류전용 시간( $H_{mij}$ )은 동류폐기 시간을 포함한다.

식 (5)는 서브시스템 i의 최대 신품으로의 교환정비 가능 횟수는 서브시스템 i의 여유 부품 수보다 적다는 것을 의미한다.

식 (6)은 동류전용의 제약식을 나타내며, 동류전용으로 부품을 복구하는 것만큼 폐기하여야 하고, 동일 정비인력에 의해 폐기와 복구가 이루어져야 한다는 것을 의미한다.(시

간적 선호 관계를 고려하였으며, 폐기할 시스템에서 부품을 탈거하여야, 복구할 시스템으로 해당 부품을 장착할 수 있기 때문이다.)

식 (7)은 정상작동하여야 동류전용으로 폐기가 가능하다는 것을 의미한다. 폐기할 시스템이라 하더라도 해당 부품을 동류전용으로 사용하기 위해서는 정상작동하여야 한다.

식 (8)은 한 개의 부품에 최대 한 명이 정비 또는 동류전용이 가능하다는 것이며, 한 개의 부품에 중복으로 정비할 수 없음을 의미한다. 동류전용 후 신품으로 교체하는 경우는 노력의 무의미하며, 노력의 낭비이기 때문이다.

식 (9)는 정비 후 부품 노후도를 최소화하는 것이며, 신품으로 교체 시 노후도 0, 동류전용으로 복구 시 불완전 정비로 노후도가  $\delta_{mij}$ 만큼 감소하게 된다.

식 (10)은 정비 후 부품 상태 최소화하는 것이며, 초기 부품 상태( $state_{mij}$ )를 기준으로 상태가 1이면 동류전용으로 폐기 여부, 상태가 0이면 복구 여부에 따라서 정비 후 부품 상태( $z_{mij}$ )가 결정된다.

식 (11)은 기준신뢰도 이상이 되는 시스템만 부품교체 또는 동류전용으로 복구하도록 결정하게 되며, 시스템  $m$ 이 기준신뢰도,  $R_0$  이상 시에만( $x_m=1$ ), 신품교환정비 또는 동류전용으로 복구가 가능하다.  $bigM$ 은 매우 큰 양의 실수를 의미한다.

식 (12)는 기준신뢰도  $R_0$ 이상인 시스템을 분류하는 것이며, 기준 이상 시  $x_m=1$ 이며,  $x_m=1$ 인 경우  $r_m$ 은 기준신뢰도  $R_0$ 보다 크거나 같아야 하며,  $x_m=0$ 인 경우  $r_m$ 은 0보다 크거나 같게 된다.

식 (13)은 시스템의 조건부 신뢰도를 계산하는 것이며, 시스템 내 부품들의 구조도에 따라 계산한다.

### 3.2 모델-2

모델-2는 작전에 필요한 최소 시스템 수를 만족하며, 기준신뢰도를 최대화하는 것이다.

$$Max Z = R_0 \tag{14}$$

subject to : (4)–(13)

$$\sum_{m \in M} x_m \geq R_m \tag{15}$$

위 최적화 모델에서 목적식 (14)는 기준신뢰도이며, 임무에 필요한 최소한의 시스템 수가 결정된 경우, 최소의 시스템 수를 고정하고, 기준신뢰도를 최대화한다. 식 (15)는 다음 임무 수행을 위한 최소한의 시스템 수 제약을 의미한다. 식 (4)~식 (13)는 최적화 모델-1에서 정의한 바와 같다.

## 4. 실험-1 실험결과 및 분석

실험-1은 모델-1과 모델-2에 임의의 파라미터를 입력하여 결과를 도출하고, 민감도 분석을 통해 두 모델의 차이에 관해 확인한다. 실험환경으로 연산 프로그램은 GAMS (ver 38.3.0)을 사용하였다. GAMS는 수학적 프로그래밍 및 최적화를 위한 모델링 프로그램이며, 다양한 문제해결을 위한 Solver들을 제공한다. 본 연구에서는 문제해결을 위한 Solver 중 BARON을 사용하였으며, BARON은 Branch-And-Reduce Optimization Navigator의 약자로 비선형계획법(Non-Linear Programming, NLP) 및 혼합정수비선형계획법(Mixed-integer Non-Linear Programming, MINLP)의 전역 최적해를 구하기 위한 GAMS의 Solver이다. BARON은 전역 최적해 탐색을 기존 Solver들보다 완화된 조건에서 보장하며, 전역 최적해 탐색 간 Lower bound 및 Upper bound를 제공하는 특징이 있다 [8]. CPU는 i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz이며, RAM 용량은 24.0GB인 환경에서 실험하였다.

### 4.1 실험-1 파라미터 입력

실험에 사용한 파라미터는 다음과 같다.

<Table 1> Parameters for Experiment-1(1/2)

$ M $	3	$T_{maint}$	10
$ I $	2	$P_{ops}$	2
$ J_i $	3, $i \in I$	$R_0$	0.5
$ K $	2	$R_m$	2
$E_i$	$E_1 = 2,$ $E_2 = 3$	$\delta_{mij}$	0.5
$T_{mij}$	$T_{m1j} = 1,$ $T_{m2j} = 2$	$\beta_{mij}$	$\beta_{m1j} = 1.5,$ $\beta_{m2j} = 3$
$H_{mij}$	$H_{m1j} = 2,$ $H_{m2j} = 4$	$\eta_{mij}$	$\eta_{m1j} = 15,$ $\eta_{m2j} = 20$

<Table 1>에서 보는 바와 같이 시스템의 수( $|M|$ )가 3개, 서브시스템의 수( $|I|$ )는 2개, 서브시스템의 컴포넌트( $|J_i|$ )는 각 3개인 임의의 시스템을 가정한다. 정비인원( $|K|$ )은 2명으로 설정한다. 실험-1의 해공간의 크기는 각 부품의 정비방법이 미정비를 포함하여 4가지의 경우의 수를 갖으므로,  $4^{|M| \times |I| \times |J_i| \times |K|} = 2^{72}$ 이다.

정비기간( $T_{maint}$ )은 10, 다음 작전기간( $P_{ops}$ )은 2이다. 모델-1 실험을 위한 기준신뢰도( $R_0$ )는 0.5로 설정한다. 모델-2 실험을 위한 임무 최소 시스템 수( $R_m$ )는 2대로 설정한다. 여유 수리부속 수( $E_i$ )로 서브시스템 1은 2개를, 서브시스템 2는 3개의 여유 수리부속을 갖도록 설정한다. 동류전용

시 시스템의 노후 감소도( $\delta_{mij}$ )는 0.5로 설정한다. 구성요소를 신제품으로의 교환시 소모시간( $T_{mij}$ )은 서브시스템-1은 1, 서브시스템-2는 2가 소모되며, 동류전용시 소모시간( $H_{mij}$ )은 이의 2배인 2와 4가 소모되도록 설정한다. 위 파라미터는 모델링 검증에 위한 임의의 값을 적용하였다.

고장 분포인 와이بل 분포의 모수인  $\beta_{mij}$ 와  $\eta_{mij}$ 는 기존 논문인 Khatab et al.[16]의 설정값을 적용한다.

<Table 2> Parameters for Experiment-1(2/2)

				$j_1$	$j_2$	$j_3$
		$i_1$	$i_2$			
$age_{mij}$	$m_1$	$i_1$		5	5	5
		$i_2$		18	16	17
	$m_2$	$i_1$		4	3	10
		$i_2$		15	12	17
	$m_3$	$i_1$		12	11	19
		$i_2$		12	10	10
$state_{mij}$	$m_1$	$i_1$		1	0	1
		$i_2$		0	0	0
	$m_2$	$i_1$		0	0	0
		$i_2$		1	1	1
	$m_3$	$i_1$		1	0	1
		$i_2$		0	1	0

<Table 2>에서 구성요소의 노후도( $age_{mij}$ )는 5에서 19에 해당하는 범위를 갖는다. 구성요소의 정비 전 상태( $state_{mij}$ )는 모든 시스템 내에서 고장(0)인 구성요소들이 포함되어 있으므로, 정비 전에 정상 작동하는 시스템은 없다.

4.2 실험-1 모델-1 실험결과

모델-1의 실험결과는 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Modeling-1 Experiment-1 Results

				$j_1$		$j_2$		$j_3$	
		$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$
$state_{mij}$	$m_1$	$i_1$					$y$		
		$i_2$		$y$	$y$				$y$
	$m_2$	$i_1$							
		$i_2$			$v'$	$v'$			$v'$
	$m_3$	$i_1$				$y$			
		$i_2$			$v$	$v$			$v$

\* Maintenance method :  $y$ (replaced with new),  $v$ (replaced with used),  $v'$ (cannibalized)

<Table 3>에서 보는 바와 같이 정비를 통하여 1, 3번 시스템을 복구하였다. 세부적인 정비방법으로 신제품교체에

해당하는  $y$ 가 서브시스템 1은 2개, 서브시스템 2는 3개로 모든 여유 수리부속을 사용하였다. 부족한 여유수리부속은 동류폐기와 동류전용을 사용하여 복구하였으며, 2번 시스템의 3개의 부품을 동류전용으로 폐기하여, 3번 시스템의 부품 3개를 동류전용으로 복구하였다. 1, 3번 시스템의 조건부 신뢰도는 기준신뢰도인 0.5 이상인 0.738, 0.573이며, 모델-1의 목적식인 식 (3) 값은 7.310이다. 각 정비 인원은 주어진 정비 기간 10을 모두 사용하였다. 모델-1의 계산 소요시간은 약 33초가 소요되었다.

4.3 실험-1 모델-2 실험결과

모델-2의 실험결과는 <Table 4>와 같다.

<Table 4> Modeling-2 Experiment-1 Results

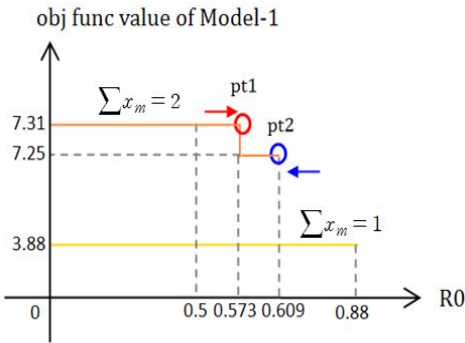
				$j_1$		$j_2$		$j_3$	
		$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$
$state_{mij}$	$m_1$	$i_1$					$y$		
		$i_2$		$v$		$v$			$y$
	$m_2$	$i_1$							
		$i_2$		$v'$		$v'$			$v'$
	$m_3$	$i_1$				$y$			
		$i_2$			$y$		$v$		$y$

\* Maintenance method :  $y$ (replaced with new),  $v$ (replaced with used),  $v'$ (cannibalized)

<Table 4>에서 보는 바와 같이 모델-2의 실험결과 또한 최적화 모델-1과 같이 1, 3번 시스템을 복구하였다. 세부적인 정비방법으로 모델-1과 같이 신제품교체에 해당하는  $y$ 가 서브시스템 1은 2개, 서브시스템 2는 3개로 모든 여유 수리부속을 사용하였다. 부족한 여유수리부속은 동류폐기와 동류전용을 사용하여 복구하였으나, 모델-1은 1번 시스템을 모두 신제품으로 교체한 반면, 모델-2는 1번과 3번 시스템에 신제품교체와 동류전용을 모두 사용하여 복구한 것을 확인할 수 있다. 이러한 정비방법의 차이에 의해 각 시스템의 조건부 신뢰도는 0.645, 0.610으로 복구된 시스템의 조건부 신뢰도는 모델-1의 그것과 다름을 확인할 수 있다. 모델-2의 목적식인 식 (14)의 값은 0.609이며, 모델-2의 계산 소요시간은 모델-1과 비슷한 약 40초가 소요되었다.

4.4 모델-1과 모델-2의 민감도 분석

x축을 기준신뢰도( $R_0$ )로 y축을 모델-1의 목적식 식 (3)으로 하여 모델-1과 모델-2의 결과를 비교하기 위해 한 개의 그래프를 사용하여 <Figure 2>로 표시하였다.



<Figure 2> Sensitivity Analysis on Model 1, 2

<Figure 2>에서 pt1은 모델-1의 파라미터인 기준신뢰도와 목적값에 따른 점이며, pt2는 모델-2의 목적값인 기준신뢰도와 그에 해당하는 모델-1의 목적값에 따른 점이다.

1대의 시스템만 복구하는 경우( $\sum x_m = 1$ ) 기준신뢰도에 따른 모델-1의 목적값은 노란실선으로 표시하였다. 2대의 시스템을 복구하는 경우( $\sum x_m = 2$ )는 주황색 실선으로 표시하였다. 모델-1이 구한 해는 pt1이며, 모델-2가 구한 해는 pt2이다. 이 경우 기준신뢰도에 따라 목적값이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 실험에서는 3대의 시스템을 다루었으나, 조건을 만족하는 시스템의 수가 3인( $\sum x_m = 3$ ) 영역은 실행불가능해(infeasible solution)이므로 <Figure 2>에 나타나지 않는다.

1대의 시스템만 복구하는 경우 모델-1의 목적값은 식 (3)을 고려시 4를 초과할 수 없다. 반면, 2대를 복구하는 경우 목적값은 기준신뢰도와 상관없이 6 이상의 값을 갖고, 8을 초과할 수 없다. 따라서 기준신뢰도 이상으로 복구된 시스템의 수에 따라 목적식 식 (3)의 값이 계층적으로 구분되어, 목적식 식 (3)의 의도대로 시스템의 수를 최대화 한다.

모델-1의 목적식 식 (3)이 목적값을 최대화하기 위해 탐색하는 방향은 <Figure 2>의 빨간 화살표에 해당한다. 즉, 제약조건인 기준신뢰도 0.5 이상에서 목적값을 최대화 한다. 반면 모델-2의 목적식 식 (14)의 목적값을 최대화하기 위해 탐색하는 방향은 <Figure 2>의 파란 화살표에 해당한다. 조건을 만족하는 시스템의 수가 2인 주황색 실선 영역에서 기준신뢰도가 최대가 되는 가능해 영역(feasible solution)을 탐색한다.

모델별 시스템간 신뢰도의 차이는 모델-1은 0.165이고, 모델-2은 0.035로, 모델-2로 정비 시 모델-1보다 시스템 간 정비수준을 균일하게 정비하였다. 반면, 시스템의 조건부 신뢰도의 합( $\sum r_m$ )은 임무 수행을 완료할 것으로 예상하는 평균 시스템의 수라고 할 수 있으며, 이 경우 모델-1은 1.31대에서 모델-2는 1.25대로 감소한다. 이는 <Figure 2>

에서도 모델-2의 목적식 값( $R_0$ )을 모델-1의 식 (12)의 파라미터로 입력하여 모델-1의 목적식 식 (3)을 구하면 모델-1의 값인 3.31(pt1)보다 낮은 값인 3.25(pt2)로 하락하는 것으로도 알 수 있다.

## 5. 실험-2 실험결과 및 분석

실험-2는 제4장의 실험-1의 규모를 늘려 실험을 실시하고, 그 결과를 분석한다. 제5장에서 별도 기술하지 않은 실험조건은 제4장의 실험-1과 동일하다.

### 5.1 실험-2 파라미터 입력

실험-1에서 사용한 파라미터 중 추가 또는 변경한 파라미터는 다음과 같다.

<Table 5> Parameters for Experiment-2(1/2)

$ M $	4	$T_{mint}$	20
$R_0$	0.5	$R_m$	3
$E_i$	$E_1 = 5, E_2 = 5$		

<Table 5>에서 보는 바와 같이 시스템의 수를 4개로 증가시켰으며, 정비시간 및 여유 수리부속의 수를 증가시켰다. 실험-2의 해공간의 크기는  $2^{26}$ 이다.

<Table 6> Parameters for Experiment-2(2/2)

$age_{mij}$	$m_4$	$i_1$	$j_1$	$j_2$	$j_3$
		$i_2$	7	9	1
$state_{mij}$	$m_4$	$i_1$	19	12	5
		$i_2$	1	0	0
			1	0	1

<Table 6>에서 새로 추가된 시스템의 구성요소의 노후도( $age_{mij}$ )와 정비 전 상태( $state_{mij}$ )는 임의의 값을 적용하였다.

### 5.2 실험-2 모델-1 실험결과

모델-1의 실험결과는 <Table 7>과 같다.

<Table 7>에서 보는 바와 같이 정비를 통하여 1, 3, 4번 시스템을 복구하였다. 세부적인 정비방법으로 신제품교체에 해당하는  $y_g$ 가 서브시스템 1과 2 모두 5개로 모든 여유 수리부속을 사용하였다. 부족한 여유수리부속은 동류폐기와 동류전용을 사용하여 복구하였으며, 2번 시스템의 3개의



부품을 동류전용으로 폐기하여, 3번 시스템의 부품 3개를 동류전용으로 복구하였다. 1, 3, 4번 시스템의 조건부 신뢰도는 기준신뢰도인 0.5 이상인 0.738, 0.687, 0.761이며, 모델-1의 목적식인 식 (3) 값은 14.186이다. 각 정비 인원은 주어진 정비 기간은 정비요원 1은 18, 정비요원 2는 9를 사용하였다. 모델-1의 계산 소요시간은 약 9시간 42분인 34,921초가 소요되었다.

<Table 7> Modeling-1 Experiment-2 Results

		$j_1$		$j_2$		$j_3$	
		$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$
state <sub>mij</sub>	m <sub>1</sub>	i <sub>1</sub>			y		
		i <sub>2</sub>		y		y	
	m <sub>2</sub>	i <sub>1</sub>					
		i <sub>2</sub>	v'		v'		v'
	m <sub>3</sub>	i <sub>1</sub>			y		
		i <sub>2</sub>	v		v		v
	m <sub>4</sub>	i <sub>1</sub>				y	
		i <sub>2</sub>	y			y	

\* Maintenance method : y(replaced with new), v(replaced with used), v'(cannibalized)

5.3 실험-2 모델-2 실험결과

모델-2의 실험결과는 <Table 8>와 같다.

<Table 8> Modeling-2 Experiment-2 Results

		$j_1$		$j_2$		$j_3$	
		$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$
state <sub>mij</sub>	m <sub>1</sub>	i <sub>1</sub>			y		
		i <sub>2</sub>	y		y	y	
	m <sub>2</sub>	i <sub>1</sub>					
		i <sub>2</sub>		v'	v'		v'
	m <sub>3</sub>	i <sub>1</sub>			y		y
		i <sub>2</sub>	y			v	v
	m <sub>4</sub>	i <sub>1</sub>				y	y
		i <sub>2</sub>		y			v

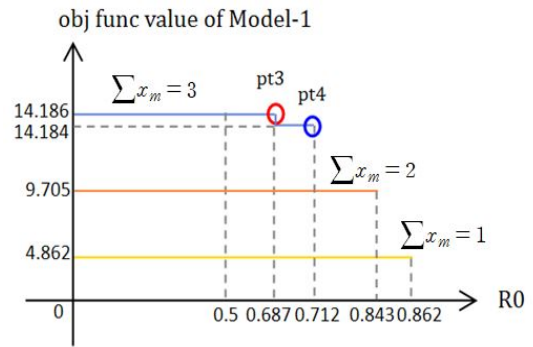
\* Maintenance method: y(replaced with new), v(replaced with used), v'(cannibalized)

<Table 8>에서 보는 바와 같이 모델-2의 실험결과 또한 최적화 모델-1과 같이 1, 3, 4번 시스템을 복구하였다. 세부적인 정비방법으로 모델-1과 같이 신제품교체에 해당하는 y가 서브시스템 1은 5개, 서브시스템 2는 5개로 모든 여유수리부속을 사용하였다. 부족한 여유수리부속은 동류폐기와 동류전용을 사용하여 복구하였으나, 모델-1은 3번 시스템을 동류전용을 사용하여 복구하였으나, 모델-2는 3번과

4번 시스템에 동류전용을 사용하여 복구한 것을 확인할 수 있다. 이러한 정비방법의 차이에 의해 각 시스템의 조건부 신뢰도는 0.738, 0.712, 0.734로 복구된 시스템의 조건부 신뢰도는 모델-1의 그것과 다름을 확인할 수 있다. 모델-2의 목적식인 식 (14)의 값은 0.712이며, 모델-2의 계산 소요시간은 모델-1에 비해 짧은 약 531초가 소요되었다.

5.4 모델-1과 모델-2의 민감도 분석

x축을 기준신뢰도( $R_0$ )로 y축을 모델-1의 목적식 식 (3)으로 하여 모델-1과 모델-2의 결과를 비교하기 위해 한 개의 그래프를 사용하여 <Figure 3>로 표시하였다.



<Figure 3> Sensitivity Analysis on Model 1, 2

<Figure 3>에서 pt3은 모델-1의 파라미터인 기준신뢰도와 목적값에 따른 점이며, pt4는 모델-2의 목적값인 기준신뢰도와 그에 해당하는 모델-1의 목적값에 따른 점이다.

1대의 시스템만 복구하는 경우( $\sum x_m = 1$ ) 기준신뢰도에 따른 모델-1의 목적값은 노란색 실선으로 표시하였다. 2대의 시스템을 복구하는 경우( $\sum x_m = 2$ )는 주황색 실선으로 표시하였다. 3대의 시스템을 복구하는 경우( $\sum x_m = 3$ )는 하늘색 실선으로 표시하였다. 실험에서는 4대의 시스템을 다루었으나, 조건을 만족하는 시스템의 수가 4인 ( $\sum x_m = 4$ ) 영역은 실행불가능해(infeasible solution)이므로 <Figure 3>에 나타나지 않는다.

1대의 시스템만 복구하는 경우 모델-1의 목적값은 식 (3)을 고려시 5를 초과할 수 없다. 반면, 2대를 복구하는 경우 목적값은 기준신뢰도와 상관없이 8 이상의 값을 갖고, 10을 초과할 수 없다. 3대를 복구하는 경우 기준신뢰도와 상관없이 12 이상의 값을 갖고, 15를 초과할 수 없다. 따라서 기준신뢰도 이상으로 복구된 시스템의 수에 따라 목적식 식 (3)의 값이 계층적으로 구분되어, 목적식 식 (3)의 의도대로 시스템의 수를 최대화하는 것을 확인할 수 있다.

모델 2의 최소 임무 요구 시스템 수( $R_m$ )를 1로 설정시의 목적값인 기준신뢰도는 0.862이며, 2로 설정시에는 기준신뢰도는 0.843의 값을 갖는다.

모델별 시스템간 신뢰도의 최대 차이는 모델-1은 0.074이고, 모델-2은 0.026로, 모델-2로 정비 시 모델-1보다 시스템 간 정비수준을 균일하게 정비하였다. 반면, 시스템의 조건부 신뢰도의 합( $\sum r_m$ )은 임무 수행을 완료할 것으로 예상하는 평균 시스템의 수라고 할 수 있으며, 이 경우 모델-1은 2.186대에서 모델-2는 2.184대로 감소한다. 이는 <Figure 3>에서도 모델-2의 목적식 값( $R_0$ )을 모델-1의 식 (12)의 파라미터로 입력하여 모델-1의 목적식 식 (3)을 구하면 모델-1의 값인 14.186(pt3)보다 낮은 값인 14.184(pt4)로 하락하는 것으로도 알 수 있다.

## 6. 결론 및 향후 연구

본 연구는 동류전용과 수리부속 부족을 고려한 다수의 시스템에 대한 정비방법을 최적화 기법을 이용하여 해를 도출하였다. 최적화 기법을 통해 기준신뢰도를 만족하는 시스템의 수를 최대화하면서, 조건을 만족하는 시스템의 수가 같은 경우 신뢰도를 최대화하는 방법과 임무 요구 시스템 수를 만족하는 가운데 기준신뢰도를 최대화하는 방법을 비교하였고, 두 모델의 민감도 분석을 통해 의사결정권자가 임무와 시스템의 특성을 고려하여 합리적인 기준신뢰도를 설정할 수 있도록 하였다.

<Figure 2>와 <Figure 3>에서 기준신뢰도( $R_0$ )를 변경시 가용한 시스템의 수가 변경되는 것을 확인하였다. 또한, 같은 시스템의 수에서도 기준신뢰도에 따라 정비방법이 달라지는 것을 확인하였다. 현실에서도 기준신뢰도 0.86에서 1대가 가용했을 때, 기준신뢰도를 0.7로 하향하여 3대를 가용하게 할 수 있을 시에는 후자의 방법을 적극적으로 고려할 수 있을 것이다.

이러한 기준신뢰도에 대한 의사결정은 임무의 특성 그리고 시스템의 특성과 밀접하게 연관된다. 임무의 특성으로 시스템이 생존할 확률이 낮은 경우 기준신뢰도를 낮춰 가용한 시스템의 수를 높일 수 있다. 그럼에도 고장 발생이 임무의 실패뿐만 아니라 시스템의 복구 불가능한 파손으로 직결되는 항공기 같은 시스템은 기준신뢰도를 일정 수준 이하로 낮추기는 제한될 것이다.

본 연구를 활용할 수 있는 분야로는 독립적이고 동일한 장비들로 이루어진 군집드론 및 물류창고의 물류 이동용 로봇 등의 정비에 활용 가능하며, 군 분야에서는 전시 또는 훈련간 대규모의 장비 피해시 동류전용을 고려한 합리적인 정비 기준 설정 및 최적 정비방법 결정에 도움이 될 것이라 기대한다.

향후 연구로 첫째, 최적화 기법의 모델의 경우, 모델의 사이즈가 증가할 경우 이를 구하는 시간이 지나치게 많이 소모되어 현실문제에 적용하기에는 제한되는 측면이 있다. 본 연구에서 다룬 6개의 구성요소를 갖는 시스템의 수가 3개인 실험인 실험-1의 경우 약 30초가 소모되었으며, 시스템의 수가 4개인 실험-2의 경우 약 9시간 40분이 소모되었다. 하지만 시스템의 수가 5개인 경우 24시간이 지나도 최적의 해를 제공해주지 못하였다. 따라서 전역 최적해를 보장하지 못하더라도 실제 정비현장에서 사용할 수 있도록 가용한 시간에 해를 제공하는 휴리스틱 모델이 필요하다.

둘째, 정비작업에 순서를 갖는 경우에 대한 모델이 필요하다. 예를 들어 자동차 정비의 경우, 엔진에 결합되어 있는 부품들을 정비하기 위해서는 우선 엔진 탈거라는 사전 준비가 필요하다.

셋째, 이를 통해 본 논문에서는 정비작업의 순서는 고려하지 않았지만, 정비작업의 순서까지 최적화할 수 있고, 이를 간트 차트 등으로 시각화할 수 있다.

넷째, 본 논문에서는 정비 인원을 2명(팀)으로 구분하였다. 실제 정비현장에서는 1인이 가능한 작업이 있는 반면, 최소 3명이 작업해야 하는 정비작업이 있다. 이 경우 작업 시간대가 동일해야 하며 이를 고려한 모델링 개발이 필요하다고 판단된다.

## References

- [1] Aggrawal, K.K., Redundancy optimization in general systems, *IEEE Transactions on Reliability*, 1976, Vol. 25, pp. 330-332.
- [2] Cassady, C.R., Pohl, E.A., and Murdock, W.P., Selective maintenance modeling for industrial systems, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2001, Vol. 7, No. 2, pp. 104-117.
- [3] Chen, C., Meng, M.H., and Zuo, M.J., Selective maintenance optimization for multi-state systems, In *Proc of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 1999, Edmonton, Canada.
- [4] Dao, C.D. and Zuo, M.J., Optimal selective maintenance for multi-state systems in variable loading conditions, *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, Vol. 166, pp. 171-180.
- [5] Dao, C.D. and Zuo, M.J., Selective maintenance for multi-state series systems with s-dependent components, *IEEE Transactions on Reliability*, 2016, Vol. 65, No. 2, pp. 525-539.
- [6] Diallo, C., Venkatadri, U., Khatib, A., and Liu, Z.,

- Optimal selective maintenance decisions for large serial k-out-of-n: G systems under imperfect maintenance, *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, Vol. 175, pp. 234–245.
- [7] Duan, C., Deng, C., Gharaei, A., Wu, J., and Wang, B., Selective maintenance scheduling under stochastic maintenance quality with multiple maintenance actions, *International Journal of Production Research*, 2018, Vol. 56, No. 23, 7160-7178.
- [8] GAMS official site, [https://www.gams.com/latest/docs/S\\_BARON.html#BARON\\_INTRODUCTION](https://www.gams.com/latest/docs/S_BARON.html#BARON_INTRODUCTION).
- [9] Gopal, K., Aggrawal, K.K., and Gupta, J.S., An improved algorithm for reliability optimization, *IEEE Transactions on Reliability*, 1978, Vol. 27, pp. 325–328.
- [10] Khatab, A. and Aghezaf, E.H., Selective maintenance optimization when quality of imperfect maintenance actions are stochastic, *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, Vol. 150, pp. 182–189.
- [11] Khatab, A., Aghezaf, E.H., Djelloul, I., and Sari, Z., Selective maintenance optimization for series-parallel systems alternating missions and scheduled breaks with stochastic durations, *International Journal of Production Research*, Vol. 55, No. 10, pp. 3008-3024.
- [12] Khatab, A., Aghezaf, E.H., Djelloul, I., and Sari, Z., Selective maintenance optimization for systems operating missions and scheduled breaks with stochastic durations, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 43, pp. 168-177.
- [13] Khatab, A. and Ait-Kadi, D., Selective maintenance policy for multi-mission multistate series-parallel systems, *In 4th International conference on advances in mechanical engineering and mechanics (ICAMEM2008)*, 2008, Tunisia.
- [14] Khatab, A., Ait-Kadi, D., and Nourelfath, M., Heuristic-based methods for solving the selective maintenance problem for series-parallel systems, *In International conference on industrial engineering and systems management*, 2007, Beijing, China.
- [15] Khatab, A., Dahane, M., and Ait-Kadi, D., Genetic algorithm for selective maintenance optimization of multi-mission oriented systems, *In Annual European safety and reliability (ESREL) conference*, 2013, Amsterdam, Netherlands.
- [16] Khatab, A., Diallo, C., Venkatadri, U., Liu, Z., and Aghezaf, E.H., Optimization of the joint selective maintenance and repairperson assignment problem under imperfect maintenance, *Computers & Industrial Engineering*, 2018, Vol. 125, pp. 413-422.
- [17] Lin, D., Zuo, M.J., and Yam, R.C., General sequential imperfect preventive maintenance models, *International Journal of Reliability Quality and Safety Engineering*, 2000, Vol. 7, No. 3, pp. 253–266.
- [18] Liu, Y., Chen, Y., and Jiang, T., On sequence planning for selective maintenance of multi-state systems under stochastic maintenance durations, *European Journal of Operational Research*, 2018, Vol. 268, pp. 113–127.
- [19] Liu, Y. and Huang, H.-Z., Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance, *IEEE Transactions on Reliability*, 2010, Vol. 59, No. 2, pp. 356–367.
- [20] Lust, T., Roux, O., and Riane, F., Exact and heuristic methods for the selective maintenance problem, *European Journal of Operational Research*, 2009, Vol. 197, pp. 1166–1177.
- [21] Maaroufi, G., Chelbi, A., and Rezg, N., Optimal selective renewal for systems subject to propagated failures with global effect and failure isolation phenomena, *Reliability Engineering and System Safety*, 2013, Vol. 114, pp. 61–70.
- [22] Maillart, L.M., Cassady, C.R., Rainwater, C., and Schneider, K., Selective maintenance decision-making over extended planning horizons, *IEEE Transactions on Reliability*, 2009, Vol. 58, No. 3, pp. 462–469.
- [23] Malik, M., Reliable preventive maintenance scheduling, *AIIE Transactions*, 1979, Vol. 11, No. 3, pp. 221–228.
- [24] Panday, M., Zuo, M.J., Moghaddass, R., and Tiwari, M.K., Selective maintenance for binary systems under imperfect repair, *Reliability Engineering and System Safety*, 2013, Vol. 113, pp. 42–51.
- [25] Pandey, M., Zuo, M.J., and Moghaddass, R., Selective maintenance modeling for multistate system with multistate components under imperfect maintenance, *IIE Transactions*, 2016, Vol. 45, pp. 1221–1234.
- [26] Rajagopalan, R. and Cassady, C.R., An improved selective maintenance solution approach, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2006, Vol. 12, No. 2, 172–185.
- [27] Rice, W.F., Cassady, C.R., and Nachlas, J., Optimal maintenance plans under limited maintenance time, *In Proceedings of industrial engineering conference*, 1998, Banff, BC, Canada.
- [28] Schneider, K. and Cassady, C.R., Evaluation and comparison of alternative fleetlevel selective maintenance mod-

- els, *Reliability Engineering and System Safety*, 2015, Vol. 134, pp. 178–187.
- [29] Sharma, J. and Venkateswaran, K.V., redundancy optimization in general systems, *IEEE Transactions on Reliability*, 1971, Vol. 20, pp. 256–259.
- [30] Zhao, J. and Zeng, J.C., Maintenance strategy for stochastic selective maintenance of a two-state system, *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 2016, Vol. 11, No. 4, pp. 302–308.
- [31] Zhu, H., Liu, F., Shao, X., Liu, Q., and Deng, Y., A cost-based selective maintenance decision-making method for machining line, *Quality and Reliability Engineering International*, 2011, Vol. 27, pp. 191–201.

**ORCID**Jangwon Lee | <http://orcid.org/0000-0002-3822-403X>Suhwan Kim | <http://orcid.org/0000-0003-4916-1713>