

# 일반고장분포를 갖는 다계층 시스템의 중복 할당 최적화

정일한

울산과학기술대학교 융합안전공학과

## Optimization of Redundancy Allocation in a Multi-Level Series System with General Failure Distribution

Il-han Chung

Department of Integrative Safety Engineering, Ulsan College

**요약** 시스템의 고장과 관련된 성능을 평가하는 척도로 평균고장시간(MTTF : mean time to failure, 이하 MTTF)이 많이 활용되어진다. 시스템의 MTTF를 증가시키기 위해서는 시스템에 신뢰도가 높은 부품을 사용하는 것과 동일한 종류의 부품을 중복해서 사용할 수 있다. 각 부품의 고장시간 분포가 일반분포를 따를 경우 시스템의 MTTF를 구하기는 어려우며, 중복을 고려할 경우 복잡도는 더욱 증가한다. 본 연구에서는 다계층 시스템의 중복할당 문제(MRAP : multi-level redundancy allocation problem, 이하 MRAP)를 다룬다. 특히, 각 부품의 고장시간이 일반분포를 따를 경우 시스템의 MTTF를 최대화 하는 중복할당 최적화 문제를 다룬다. 시스템 MTTF를 구하기 위해 시뮬레이션을 사용하는 방법을 제시하며, 최적화를 위해 유전알고리즘 방법을 활용한다. 수치예제를 통해 다양한 자원제약에서 MTTF의 변화와 중복할당의 변화를 살펴본다.

**Abstract** Mean time to failure (MTTF) is often used to evaluate performance related to system failure. In order to increase system MTTF, the same type of parts can be used redundantly in the system. However, if the failure time distribution of each component follows a general distribution, it is difficult to obtain system MTTF, and this becomes even more complicated when redundancy is considered. In this study, a multi-level redundancy allocation problem (MRAP) was considered. In particular, the redundancy allocation optimization method for maximizing the MTTF of a system was shown when the failure time of each component followed a general distribution. A simulation-based method used to obtain the system MTTF is presented, and a genetic algorithm method was utilized for optimization. Changes in MTTF and redundancy allocation due to resource constraints are discussed using numerical examples.

**Keywords** : MRAP, Multi-level, Redundancy Optimization, GA, General Failure Distribution

### 1. 서론

시스템의 설계 과정에서는 다양한 성능 지표를 정의하게 된다. 예를 들어, 국방에서 사용하는 전차나 장갑차의 경우 주행 성능, 방호 성능, 공격 성능 등을 설계과정에서 정하게 된다. 이런 장비의 기능적 성능 외에도 시스템

의 고장 및 정비와 관련된 성능을 나타내는 신뢰도, 정비도, 가용도 또한 중요한 성능 지표 또는 품질지표로 여겨진다. 시스템에 발생하는 고장은 고장의 종류에 따라 경미할 수도 또는 치명적일 수도 있다. 특히, 무기 또는 항공기, 기차와 같은 수송과 관련된 시스템에 치명적 고장이 발생할 경우 그 영향은 매우 크게 나타날 수 있다. 시

\*Corresponding Author : Il-han Chung(Ulsan College)

email: ihchung@uc.ac.kr

Received April 2, 2024

Accepted June 7, 2024

Revised May 8, 2024

Published June 30, 2024

시스템의 신뢰도를 향상 시키기 위해서는 신뢰도가 높은 부품을 사용하는 것이 일반적이나, 현 기술 수준에서 부품 신뢰도를 향상 시키는데 매우 높은 비용이 들거나 불가능할 경우 동일한 부품을 중복으로 사용할 수 있다.

규모가 큰 시스템은 하위에 몇 개의 하부시스템으로 구성되어 있으며, 하부시스템 아래에도 역시 몇 개의 부품 또는 하부시스템으로 구성되어 있다. 신뢰도를 높이기 위해 중복을 할 경우 최하위 부품을 중복하는 것이 가장 효율적이나 부품이 모듈(몇 개의 품목으로 구성된 품목의 집단)로 만들어져 나오거나 부품단위로 중복할 경우 설계시간 및 비용이 상당히 증가하는 경우 모듈 단위로 중복을 고려하는 것이 필요하다.

중복 할당 최적화 문제는 NP-hard 문제로 다양한 시스템 상황에 따른 최적화 방법이 연구되어지고 있다. 특히, Yun and Kim[1]은 시스템이 다계층 구조로 표현될 때 모듈 중복을 고려하는 문제(MRAP)를 다루었다. 이때 시스템, 모듈, 부품 등의 시스템 계층에서 품목간 직계선 상에 단 한 개를 선택해서 중복이 가능한 것으로 다루었으며, 최적화 모형에서는 각 품목의 신뢰도가 주어질 경우에 대해 다루었다. 이후 Yun et al.[2]에서는 다계층 시스템에서 직계선 상에서 여러 개의 모듈 및 부품을 동시에 중복이 가능한 문제를 다루었다.

MRAP에서 Yun and Kim[1], Yun et al.[2], Chung et al.[3], Jang and Kim[4], Chung[5], Farsi[6] 등에서는 각 품목에 신뢰도가 주어져 있는 경우에 탐색기법을 달리 적용했을 때 결과에 대한 비교를 나타내었다. Chung[7]은 Yun and Kim[1]과 동일한 MRAP에서 대안 품목이 존재하는 경우에 대해 다루었으며, Pourdarvish and Ramezani[8]는 각 부품 고장시간이 지수분포를 따를 경우 대기구조를 고려한 다계층시스템의 중복문제를 다루었다.

시스템 고장이 발생하였을 경우 모듈을 교체할 경우 정비시간을 단축시킬 수 있어 가용도에 유리하다. Chung[9]과 Han et al.[10]은 각 부품의 고장시간이 지수분포를 따를 경우 목표가용도를 최대화하는 MRAP를 다루었으며, 이때 가용도 산출을 위해 시뮬레이션을 활용하였다.

이와 같이 중복할당 문제에서는 문제의 복잡성으로 인해 대상 부품에 대한 정보가 신뢰도인 확률을 가지거나, 고장시간이 지수분포인 경우에 대해서 다루고 있다. 그러나, 시스템 설계시에 주로 활용하는 신뢰도 척도는 MTTF이며, 각 부품의 고장시간에 대한 분포는 일반분포로 앞서 연구결과를 활용하기는 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 MRAP에서 각 부품의 고장시간이 일반분포를 따르는 경우 시스템의 MTTF를 최대화하는 문제를 다룬다. 고장시간 발생을 위해 시뮬레이션을 적용하며, 최적해 탐색을 위해 유전알고리즘을 사용한다. 2장에서는 MRAP에 대한 설명과 MTTF를 부품의 고장시간이 일반분포인 경우 시스템 MTTF를 최대화하는 모형을 수립한다. 3장에서는 유전알고리즘과 시뮬레이션을 활용한 최적 중복 할당 탐색 방법을 다루며, 4장에서는 2장과 3장에서 다룬 모형과 방법을 바탕으로 수치예제를 나타낸다. 마지막 5장에서는 연구결과에 대한 토의 및 추후 연구에 대해 다룬다.

## 2. 다계층 시스템 중복 할당 모형

### 2.1 다계층 시스템 중복할당 제약 조건

다계층 시스템에 중복 할당 모형에 필요한 제약은 Yun and Kim[1]에서 정의한 제약과 동일하게 본 연구에서는 적용한다. 이에 필요한 기호는 고장분포 및 평균 고장시간을 제외하고 Chung[5]에서 정의한 기호를 활용한다. 본문에서 사용되는 용어 중 품목은 시스템, 모듈, 최하위 부품을 총칭해서 사용하며, 부품은 최하위 부품으로 다계층 구조에서 해당 품목 하위에는 품목이 없음을 의미한다.

기호

$U_i$  :  $i$ 번째 품목(시스템, 모듈, 최하위 부품)

$U_{i,m}$  :  $U_i$ 의  $m$ 번째 하위 품목

$U^L$  :  $U_i$ 의 품목 중 최하위 품목의 집합

$C_i$  :  $U_i$ 의 비용(부품 가격)

$\lambda_i$  :  $U_i$ 의 중복할당시 부가되는 부가적 비용

$x_i$  :  $U_i$ 에 할당된 중복 수

$\tau_i$  :  $i$ 품목의 고장 시간

$\tau_{ij}$  :  $i$ 모듈 품목의  $j$ 최하위 품목 고장 시간

$j_f$  :  $U_j$ 품목을 제외한  $U_j$  직계선 상 품목의 집합

$MTTF_S$  : 시스템의 평균고장간격

$N$  : 총 부품 수

$N_i$  :  $U_i$ 의 하위 품목 수

$y_i$  : 0 or 1 :  $U_i$  가 중복이 적용되면 1, 아니면 0

$C(x_i)$  :  $U_i$ 의 중복수가  $x_i$ 인 경우  $U_i$  중복에 필요한 지원

$C_T$  : 시스템 비용 제약

$x_i^U$  :  $x_i$ 의 상한

Fig. 1은 계층 수가 3인 시스템을 나타낸다. 시스템을 나타내는  $U_1$ 의 하위에는 3개 모듈  $U_{11}$ ,  $U_{12}$ ,  $U_{13}$ 이 있으며, 각 모듈은 2~3개의 부품으로 구성되어 있다. MRAP에서는 직계선 상에 하나를 선택해서 중복이 가능한데, 예를 들어 Fig. 1에서 최하위 부품  $U_{111}$ 을 기준으로 직계선은  $\{U_1, U_{11}, U_{111}\}$ 와 같이 나타나며 직계선에 있는 모듈과 부품 중 하나를 선택해서 중복 구조를 만들 수 있다. 즉,  $U_{11}$ 과  $U_{111}$ 을 모두 중복 구조로 만드는 것은 현 연구대상에서 제외된다.

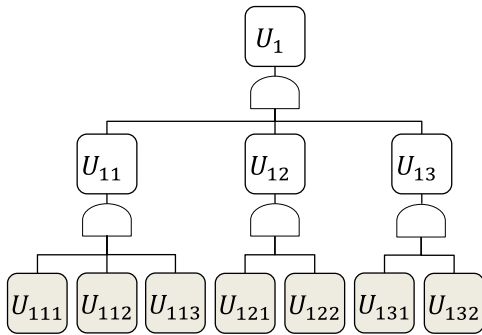


Fig. 1. Multi-level system

## 2.2 일반고장분포를 갖는 다계층 시스템

Yun and Kim[1] 등 다양한 MRAP 관련 연구에서 각 부품에 주어진 정보는 신뢰도이다. Fig. 1에서  $U_i$ 가 신뢰도를  $R_i$ 일 경우  $R_i$ 는 하위부품 또는 모듈의 신뢰성 구조가 직렬이므로 다음 Eq. 1과 같이 구할 수 있다.

$$R_i = \prod_{j=1}^{N_i} R_{ij} \quad (1)$$

또한, 각 부품 및 모듈을 중복할 경우 신뢰도는 다음 Eq. 2와 같이 간단히 계산할 수 있다.

$$R_i^{x_i} = 1 - (1 - R_i)^{x_i} \quad (2)$$

각 부품의 고장이 일반분포를 따를 경우 하위부품 또는 모듈의 신뢰성을 Eq. 1과 같이 계산할 수 없으며, Eq. 3과 같이 각 하위 부품 또는 모듈이  $t$ 시간까지 생존할 확률을 통해 구할 수 있다.

$$R_i(t) = P(\tau_i \geq t) = \prod_{j=1}^{N_i} P(\tau_{ij} \geq t) \quad (3)$$

$$MTTF_i = \int_0^{\infty} R_i(t) dt$$

## 2.3 최적화 모형

본 연구에서는 시스템의 MTTF를 최대화 하는 다계층 중복 할당을 문제를 다룬다.

Eq. 4는 목적함수로 시스템 MTTF를 최대화 함을 의미하며, Eq. 5는 자원에 대한 제약을 나타낸다. 각 품목을  $x_i$ 개 중복할 경우 소요되는 비용 또는 자원은  $C(x_i)$ 이며, 전체 자원은  $C_T$ 를 초과할 수 없다. Eq. 6은 직계선 상에 하나의 품목만 중복이 가능한 함을 나타낸다. Eq. 7은 각 품목의 중복 수를 나타내는  $x_i$ 와 직계선 상에 선택되는 품목을 나타내는  $y_i$ 의 관계를 나타내고 있다.

$$\text{Max } MTTF_{sys} \quad (4)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^N C(x_i) \leq C_T \quad (5)$$

$$y_j + \sum_{k \in j_f} y_k = 1 \quad (6)$$

$$y_i = 0 \text{ or } 1 \text{ for } \forall i$$

$$x_i = 0 \text{ if } y_i = 0, \quad (7)$$

$$x_i \geq 1 \text{ if } y_i = 1,$$

Eq. 8에  $C(x_i)$ 는 품목에 중복 수가 증가하면 비례해서 증가하는 요소와 중복 수가 많으면 지수로 증가하는 요소의 합으로 구성되어질 수 있다. 이는 중복 수가 증가할수록 설계의 복잡성 및 주변 환경 영향성을 고려하여 나타낸다.

$$C(x_i) = C_i x_i + \lambda^{x_i} \quad (8)$$

## 3. 최적 중복 할당 탐색

본 연구에서는 다계층 구조를 갖는 시스템의 MTTF를 최대화 하는 최적 중복 할당을 구하기 위해 각 품목의 고장시간 발생과 MTTF 계산은 시뮬레이션을 활용하며, 최적해의 탐색은 유전알고리즘을 활용한다. 유전알고리즘을 적용하기 위해 초기해를 생성하고, 교차연산자와 돌연변이연산자를 활용하여 다음 세대해를 만든다. 모든 대안해는 평가를 위해 Fig. 2에서와 같이 시뮬레이션을 통해 시스템 MTTF를 산출하고 각 대안해에 대한 적합도를 계산한다.

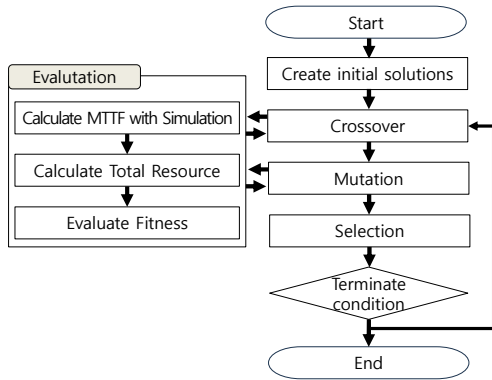


Fig. 2. Optimization Process

### 3.1 일반고장분포를 활용한 평균고장시간

최하위 부품의 고장시간 분포가 일반분포를 가지는 경우 Eq. 1과 같이 모듈 품목에 대한 신뢰도를 계산할 수가 없다. 따라서, 고장시간 분포가 일반분포인 경우 최하위 품목이 중복구조를 갖는 경우와 모듈 품목이 중복구조를 갖는 경우로 나누어 볼 수 있다.

먼저 최하위 부품만 중복 구조를 가지고, 모듈 품목이 없는 경우에는 시뮬레이션을 통해 시스템의 고장시간을 다음과 같이 구할 수 있다.

- 단계1: 고장시간 분포를 바탕으로 모든 최하위 품목에 고장 시간 발생
- 단계2: 중복된 최하위 품목의 고장 시간 중 최대값 산출
- 단계3: 모든 품목 중 최소 고장 시간 산출

$$\min_i \max_k (\tau_i^k) \quad (9)$$

모듈 품목의 중복이 있는 경우에는 모듈 품목을 구성하는 하위 품목의 고장시간 중 최소값을 구하고 중복 모듈 중 앞서 구한 최소값 중 최대값을 중복된 모듈 품목의 고장시간으로 사용할 수 있으며, 다음과 같은 절차로 구할 수 있다.

- 단계1: 고장시간 분포를 바탕으로 모든 최하위 품목에 고장 시간 발생
- 단계2: 모듈 1개의 고장시간은 모듈 하위에 최하위 부품의 고장시간 중 최소값
- 단계3: 중복된 모듈의 고장시간은 모듈 품목별 고장시간 중 최대값
- 단계4: 시스템 고장시간은 모든 품목 중 최소 고장시간

$$\tau_i^k \text{가 모듈인 경우, } \tau_i^k = \min(\tau_{ij}) \quad (10)$$

$$\min_i \max_k (\tau_i^k)$$

### 3.2 유전 알고리즘

최적해를 탐색하기 위해 유전알고리즘을 사용한다. 유전알고리즘은 입자군집알고리즘, 타부탐색 등 다양한 탐색방법과 같이 비선형문제 및 NP-hard 문제를 탐색하는데 효과적이다. 특히, 다양한 중복할당 문제에서 좋은 성능을 나타내고 있다. MRAP와 관련하여 Yun and Kim[1]에서 유전알고리즘을 제시하였으며, 본 연구에서는 일반고장분포를 가지는 문제를 적용하고 탐색의 효율성을 높이기 위해 유전알고리즘을 개선하여 활용한다.

#### 3.2.1 해의 표현

MRAP에서 결정변수는 Eq. 4~Eq. 7에 나타난 모형에서 각 품목 중복 수를 나타내는  $x_i$ 와 직계선 상에서 중복대상을 의미하는  $y_i$ 이다. 따라서, 하나의 해는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{N-1}, y_{N-1}), (x_N, y_N)\}$$

#### 3.2.2 초기 모집단

MRAP에서 대안해는 Eq. 6을 만족하여야 한다. 초기해에서 Eq. 6을 만족하는 해를 임의로 생성할 경우 해를 수정하는 과정에서 많은 계산시간이 소요되게 된다. 따라서, 본 연구에서는 모든 초기해는 최하위 부품에  $x_i$ 와  $y_i$ 가 1을 가지는 것으로 설정하였다.

#### 3.2.3 중복 수 상한 설정

탐색 시간을 줄이기 위해서는 탐색 공간을 제한하는게 필요하다. Eq. 5는 자원에 대한 제약을 나타내며, 각 품목을 중복할 경우 총 자원은 Eq. 5에  $C_T$ 를 초과할 수 없다. 따라서, 각 품목의 상한은 각 품목 직계선 상 품목을 제외한 최하위 부품의 수가 1개일 때 해당 품목이 Eq. 5를 만족하면서 가질 수 있는 최대값으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C(x_i) = C_i x_i + \lambda^{x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, N$$

$$C_o = \sum_{k \in U^t, k \neq i_j}^N C(x_k | x_k = 1)$$

$$x_i^U = \max(x_i \mid C(x_i) + C_o \leq C_T)$$

### 3.2.4 교차연산

유전알고리즘에서는 다양한 교차연산자를 활용할 수 있다. MRAP에서는 교차로 인해 발생하는 실현 불가능 해의 발생을 최소화 하기 위해 가장 단순한 교차인 일점 교차를 적용한다.

- 임의의 두 대안해를 선택
- 교차점을 임의로 선택
- 교차점을 기준으로 두 대안해를 교환

교차 이후 새롭게 생성된 두 대안해는 Eq. 6을 만족하지 못할 수 있다. 이러한 유효해를 판단하기 위해 최하위 부품별로 직계선 상 품목의  $\sum y_i$ 가 1이 아닌 경우를 선별하고,  $\sum y_i$ 가 0인 경우

- 직계선 상 품목 중 하나를 임의로 선택( $i$ 일 경우)하여  $y_i$ 를 1로,  $x_i$ 를  $1 \sim x_i^U$ 사이에 임의로 선택하고,
- 직계선 상에 나머지 품목( $j \in i, j \neq i$ )의  $x_j$ 와  $y_j$ 에 대해 0으로 설정한다.

$\sum y_i$ 가 1보다 큰 경우에는

- $y_i$ 가 1인 직계선 상에 품목 중 하나를 임의로 선택( $i$ 일 경우)하고, 나머지 품목의  $y_j$ 와  $x_j$ 를 0으로 설정한다.

### 3.2.5 돌연변이 연산

돌연변이는 해의 지역 최적화에서 벗어나기 위한 방법으로 적용되며, 일점 돌연변이를 적용한다.

- 임의의 유전자를 선정( $i$ 일 경우)하여  $y_i$ 를 1로  $x_i$ 를  $1 \sim x_i^U$ 사이에 임의로 선택하고  $i$ 가 최하위 부품인 경우( $i \in U^L$ ) 직계선 상에 있는 나머지 품목의  $x_j$ 와  $y_j$ 에 대해 0으로 설정한다.
- $i$  품목이 모듈인 경우  $i$  품목을 제외하고 직계선 상에 있는 모든 품목의  $x_j$ 와  $y_j$ 에 대해 0으로 설정한다.

유효해의 점검과 해의 수정은 교차에서 적용한 방법과 동일하다.

### 3.2.6 해의 평가

각 해를 평가하기 위해 대안해별 총 소요자원량( $\sum C(x_i)$ )와  $MTTF_s$ 을 산출한다.  $MTTF_s$ 는 3.1에서 설명한 방법과 같이 구할 수 있다. 해의 총 자원량이

자원제약( $C_T$ )를 초과할 경우 벌금을 적용하며, 벌금의 적용 크기를 위해 가중치  $\alpha$ 를 적용한다.

$$E(\nu_k) = MTTF_s(\nu_k) - \max(0, \alpha(C(\nu_k) - C_T))$$

### 3.2.7 다음 세대 해 선택

다음 세대 해는 현 세대의 유전자와 앞서 생성된 교차 연산 및 돌연변이를 통해 생성된 유전자 중 가장  $E(\nu_k)$ 가 큰 유전자를 대안해 수 만큼 선정하여 다음 세대에 활용한다.

## 4. 수치 예제

수치 예제에서는 Fig. 1과 같이 임의의 3수준 시스템을 정의한다. Fig. 1에 구성된 모든 품목간의 신뢰성 구조는 직렬이며, 최하위 품목의 고장시간은 와이블 분포를 따르고 형상모수와 척도모수는 Table 1과 같다. 또한, 각 품목에 필요한 자원은 현 수치예제에서는 비용으로 나타내었으며, 각 품목별 단가와 중복시에 추가되는 비용은 아래 표와 같다.

Table 1. Input Data

item	shape	scale	price	add
$U_{11}$	-	-	26	2
$U_{12}$	-	-	19	3
$U_{13}$	-	-	21	2
$U_{111}$	1	1000	5	3
$U_{112}$	2	500	6	4
$U_{113}$	2	1000	5	4
$U_{121}$	2.5	500	6	4
$U_{122}$	1.5	1500	7	4
$U_{131}$	1	500	8	3
$U_{132}$	3	1500	7	4

각 대안해의 평가를 위해 최하위 품목에 고장을 1000번 발생하여 3.1절에서 설명한 바와 같이 시스템의  $MTTF$ 를 산출하였다. 대안해는 실험당 각 100개를 만들고, 100세대 만큼 반복하여 실험을 실시하였다. 유전알고리즘에서 교차 비율은 0.3, 돌연변이 비율은 0.1로 설정하였으며, 실험은 비용계약으로 100~250까지 50씩 증가시켜가며 4가지 경우에 대해 실시하였다.

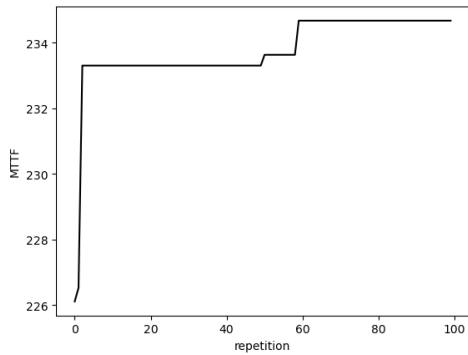


Fig. 3. MTTF Change according to Number of Repetition

Fig. 3은 비용제약이 100일 때 세대 수가 증가하면서 해가 개선되는 과정을 보여준다. 초기 MTTF는 226에서 시작하여 세대수가 세대 수가 60일 때 최적해에 수렴되고 있다.

Table 2는 비용제약에 대한 실험결과를 나타낸다. 비용제약의 크기가 증가할수록 시스템 MTTF도 같이 증가함을 알 수 있으며, 총 소요된 비용은 제약비용을 만족함을 볼 수 있다.

Table 2. Experiment Result : System MTTF Trend

cost limit	system MTTF	total cost
100	244.59	96
150	330.03	149
200	380.62	195
250	407.02	241

Table 3. Experiment Result : Redundancy Allocation

item	cost limit			
	100	150	200	250
$U_{11}$	0	0	3	3
$U_{12}$	1	2	2	3
$U_{13}$	0	2	0	3
$U_{111}$	2	2	0	0
$U_{112}$	1	2	0	0
$U_{113}$	1	1	0	0
$U_{121}$	0	0	0	0
$U_{122}$	0	0	0	0
$U_{131}$	2	0	3	0
$U_{132}$	1	0	1	0

Table 3은 제약비용에 따라 각 품목별 중복할당 수의 변화를 보여 준다. 비용제약의 크기가 증가할수록 모듈 품목의 중복할당으로 변화해 가는 경향을 보여주고 있다. 이는 비용이 증가할 경우 중복할당 수가 커질 수 있으며, 중복할당 수가 증가할수록 하위수준에 비용 증가가 커 모듈 품목 단위에 중복을 선택한 것으로 판단된다. 또한, 비용증가와 MTTF증가에 대한 비교시 모듈이 유리하게 나타나서 이와 같이 결과가 나왔을 것으로 판단된다.

### 5. 결론

시스템에 사용되는 부품의 고장시간은 다양하게 나타날 수 있다. 여러 개의 부품으로 구성된 시스템에서 각 부품의 고장시간 분포가 다양하게 나타날 경우 시스템의 고장시간을 찾기는 어려우며, 부품에 중복이 있을 경우 복잡도는 더욱 증가하게 된다.

본 연구에서는 부품의 고장시간이 일반분포를 따를 때 다계층 시스템의 최적 중복 할당 문제를 다루었다. 다계층 시스템에서 모듈 및 부품에 중복이 가능할 경우 자원 제약 및 직계선 상 중복에 대한 제약을 바탕으로 시스템의 MTTF를 최대화 하기 위한 최적화 모형을 제시하였으며, 유전알고리즘을 활용하여 최적화 방안을 나타내었다. 유전알고리즘에서는 일점교차와 일점돌연변이를 활용하여 다음 세대의 다양한 해를 생성하였으며, 각 해의 적합도를 평가하기 위해 MTTF 산출시 시뮬레이션을 활용하였다. 수치예제를 통해 자원제약이 증가할수록 시스템 MTTF가 증가함을 보여 주었으며, 최하위 부품의 중복과 모듈 중복 할당의 변화를 나타내었다. 본 연구결과로부터 MRAP에서 부품의 고장 분포가 다양할 경우에 대한 활용이 가능해져 중복할당 최적화 활용에 대한 범위가 넓어졌을 것으로 판단된다. 추후 연구에서는 각 부품이 일반분포를 가질 경우 정비를 고려하여 가용도 최적화 문제를 다룰 수 있으며, 모듈과 모듈간에 제약이 존재할 경우 이를 해소하기 위한 연구가 필요하다.

### References

[1] W. Y. Yun, J. W. Kim, "Multi-level redundancy optimization in series systems", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.46, No.2, pp.337-346, Apr. 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2003.12.013>

[2] W. Y. Yun, Y. M. Song, H. G. Kim, "Multiple multi-level

redundancy allocation in series systems”, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.92, No.3, pp.308-313, Mar. 2007.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2006.04.006>

- [3] I. H. Chung, W. Y. Yun, H. G. Kim, “Redundancy optimization in multi-level system using metaheuristics”, *Recent Advances in Stochastic Operations Research II*(edited by T. Dohi, S. Osaki, and K. Sawaki), pp.183-200, Apr. 2008.  
DOI: [https://doi.org/10.1142/9789812791672\\_0013](https://doi.org/10.1142/9789812791672_0013)
- [4] K. J. Jang, J. H. Kim, “A tabu search for multiple multi-level redundancy allocation problem in series-parallel systems”, *International Journal of Industrial Engineering*, Vol.18, No.3, pp.120-129, Aug. 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2007.06.004>
- [5] I. H. Chung, “Redundancy Allocation in A Multi-Level Series System by Cuckoo Search”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.4, pp.334-340, Mar. 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.4.334>
- [6] M. A. Farsi, “Optimal Multi-Level Redundancy Allocation Using a New Modified Bat Algorithm”, *International Journal of Reliability, Risk Safety:Theory and Application*, Vol.5, No.2, pp.41-42, Dec. 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.30699/IJRRS.5.2.5>
- [7] I. H. Chung, “Optimization of Redundancy Allocation in Multi Level System considering Alternative Units”, *Journal of Korean Society for Quality Management*, Vol.43, No.1, pp.31-42, Mar. 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.7469/jksqm.2015.43.1.031>
- [8] A. Pourdarvish, Z. Ramezani, “Cold standby redundancy allocation in a multi-level series system by memetic algorithm”, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol.20, No.3, pp.1-16, Jun. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1142/s021853931340007x>
- [9] I. H. Chung, “Optimization of Redundancy Allocation in Multi Level System under Target Availability”, *Journal of Korean Society for Quality Management*, Vol.41, No.3, pp.413-422, Sep. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.7469/jksqm.2013.41.3.413>
- [10] Y. J. Han, W. Y. Yun, J. Y. Lee, “A simulation-based multi-level redundancy allocation for a multi-level system”, *International Journal of Performability Engineering*, Vol.11, No.4, pp.357-367, Dec. 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.23940/iipe.15.4.p357.mag>

정 일 한(II-han Chung)

[중신회원]



- 2009년 9월 : 부산대학교 산업공학과 (공학박사)
- 2004년 6월 ~ 2010년 8월 : 현대로템(주) 기술연구소 주임연구원
- 2010년 9월 ~ 2011년 10월 : 포스코 생산성연구센터 총괄직

• 2011년 10월 ~ 2014년 2월 : 국방기술품질원 품질경영본부 선임연구원

• 2014년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 융합안전공학과 교수

<관심분야>

신뢰성공학, 품질공학, 시뮬레이션, 최적화