

## 운영유지비용을 고려한 신뢰도 할당 모형의 선정 (A Selection Methodology for Reliability Allocation Models to Minimize the Operating Cost)

박 종 화(Jong-hwa Park)\*, 김 기 태(Ki-tae Kim)\*\*, † 전 건 옥(Geonwook Jeon)\*\*\*

### 초 록

시스템의 성능과 안전성을 보장하기 위해서는 개발 초기부터 신뢰도에 대한 연구가 이루어져야 한다. 시스템의 목표 신뢰도를 수립하고, 이를 달성하기 위하여 하부시스템 및 부분품에 신뢰도를 할당해야 한다. 시스템의 획득 및 개발에 있어서 성능이 우수하고 비용이 저렴하더라도 고장이 빈번하게 발생한다면 원활한 임무 수행에 많은 영향을 미치고, 막대한 운영유지비용이 소요될 것이다. 본 연구에서는 신뢰도 할당 모형과 운영유지비용과의 관계를 알아보기 위하여 기존의 알려진 신뢰도 할당 모형들을 검토 및 평가하였다. 신뢰도 할당 모형의 평가는 차기 개발 함정용 디젤 엔진을 대상으로 하였으며, 다양한 신뢰도 할당 모형에 목표 신뢰도를 고려하여 신뢰도를 할당하고, 현재 운영하는 함정용 디젤 엔진의 자료를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하여 운영유지비용을 최소화하는 신뢰도 할당 모형을 선정하였다.

### ABSTRACT

Reliability should be done from the initial stage of development to secure performance and safety of system. To establish and achieve target reliability of a system, reliability should be allocated into the subsystems. In the acquisition and development of a system, frequent failures will cause a negative effect on performing mission and occurs increasing operating cost. This study reviewed and evaluated the existing reliability allocation models using operation and maintenance costs to find the correlation between reliability allocation models and its operating cost. A target system reliability on the diesel engine to be developed for naval vessels is allocated into its subsystem based on the existing reliability allocation models. A selection methodology for reliability allocation models was made to minimize operating cost by using simulation based on the given operating diesel engine data for naval vessels.

**Keywords : Reliability Allocation, Relex OpSim, Operating Cost**

논문접수일 : 2009년 9월 4일    논문게재확정일 : 2009년 12월 18일

\* 해군 제2함대사령부

\*\* 국방대학교 운영분석학과 박사과정

\*\*\* 국방대학교 운영분석학과 부교수

† 교신저자

# 1. 서론

오늘날 개발되는 시스템은 고도의 정밀성과 첨단 기능을 요구함으로써 개발기간의 장기화 및 막대한 투자비용을 필요로 한다. 시스템의 획득 및 개발에 있어서 성능이 우수하고 가격이 저렴하다 하더라도 빈번한 고장 발생과 정비에 많은 시간, 인원, 시설이 요구된다면 임무수행에 지대한 영향을 미칠 뿐만 아니라 많은 운영유지 비용이 소요될 것이다. 따라서 최적의 신뢰도를 갖춘 시스템이 개발되어야 하고, 신뢰도를 고려한 시스템을 개발하기 위해서는 신뢰도에 대한 연구가 이루어져야 한다.

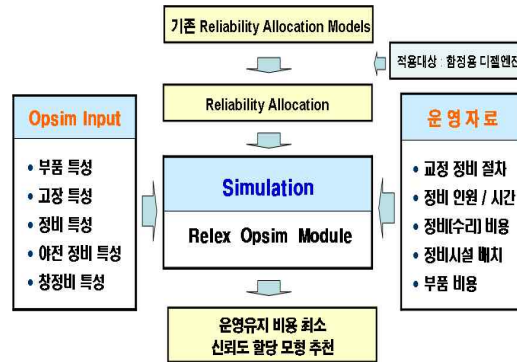
신뢰도 할당은 시스템 개발의 시작이며, 성능과 안정성을 만족시키기 위한 필수 절차로 시스템 개발에서 가장 중요한 업무라 할 수 있다. 이러한 신뢰도 할당에 관한 연구는 활발히 이루어지지 않았으며, 절차의 정립이 미흡한 실정으로 그 내용을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 다양한 신뢰도 할당 방법에 대한 소개나 정리가 되지 않았다. 국내외 유수의 신뢰도 관련 서적에서도 동일한 내용의 소수 방법만이 소개되고 있어 시스템 개발자들의 신뢰도 할당 업무에 대한 접근이 어려워지고 있다.

둘째, 최적의 신뢰도 할당 방법의 선정이 곤란한 실정이다. 신뢰도 할당은 일정한 기준을 가지고 신뢰도를 하부체계에 할당하여야 한다. 그러나 대부분의 할당 방법의 기준인 가중 변수(Weight Factor)에 주관적인 의견이 반영되어 있으며, 객관적으로 할당하였다 하더라도 신뢰도 할당이 최적화되었다고 증명할 수 있는 방법이 부재하다. 따라서 어떤 방법이 어느 시스템에 적합하다고 판단하기가 쉽지 않다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 기존에 연구되거나 사용되고 있는 다수의 신뢰도 할당 모형을 정리 및 검토하고, 목표 신뢰도 만족을 위하여 가장 효과적으로 사용할 수 있

는 신뢰도 할당 절차를 도출하고자 한다. 본 연구에서는 차기 개발 합정용 디젤 엔진을 대상으로 다양한 신뢰도 할당 모형을 이용하여 신뢰도 할당 결과를 산출하고, 현재 국내에서 운영하고 있는 합정용 디젤 엔진의 운영 자료를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하여 운영유지 비용을 최소화 하는 신뢰도 할당 모형의 선정 절차는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 신뢰도 할당 모형의 선정 절차

# 2. 신뢰도 할당 모형 및 기존 연구 검토

## 2.1 신뢰도 할당 모형

다양한 방법으로 수행되는 신뢰도 할당의 기존 모형은 다음과 같다.

### 2.1.1 단순 할당 모형(Simple Allocation)

단순 할당 모형은 평균 고장 시간(MTBF)을 고장률로 변환하여 하부 요소에 할당하는 것으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{system} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n \quad (1)$$

$\lambda_{system}$  : 전체 시스템의 고장률,  
 $\lambda_i$  : 하부시스템  $i$  의 고장률,  
 $i = 1, 2, \dots, n$

위의 방법으로 신뢰도를 할당함에 있어서 추후에 있을 수 있는 기능 추가나 시스템 디자인 변경 등의 상황에 대비하기 위하여 고장률의 일부분을 예비로 남겨두며, 일반적으로 요구되는 시스템 신뢰도의 90% 정도만을 각 하부시스템에 할당한다. 따라서 초기 할당(Initial Allocation)의 결과는 식(2)와 같은 관계가 성립한다.

$$\lambda_{system} > \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n \quad (2)$$

### 2.1.2 균등 할당 모형

(Equal Apportionments Technique Allocation)

균등 할당 모형은 단순히 각각의 하부시스템에 동일한 신뢰도를 할당하는 방법으로 각 하부시스템이 동일한 신뢰도 목표를 갖고 있다는 가정 하에 n개의 하부시스템에 신뢰도를 할당한다. 직렬로 구성된 하부시스템의 수량만 있고, 결정적인 정보가 없을 경우 합리적인 방법이다. 하지만 각 하부시스템에 대한 복잡성(Complexity)이나 디자인 요소들을 고려하지 않기 때문에 차후에 신뢰도를 재할당(Reallocation)할 필요가 있다.

하부시스템  $i$ 에 할당된 신뢰도는 식(3)과 식(4)에 의해 구할 수 있다.

$$R_{system} = \prod_{i=1}^n R_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$R_i = (R_{system})^{1/n} \quad (4)$$

$R_{system}$  : 전체 시스템의 신뢰도,  
 $R_i$  : 하부시스템  $i$ 의 신뢰도

균등 할당 모형은 구성품에 의한 균등 할당 모형(Equal Apportionment by Component)과 하부시스템에 의한 균등 할당 모형(Equal Apportionment by Subsystem)으로 분류된다. 구성품에 의한 균등 할당 모형은 시스템 고장률을 전체 시스템의 모든 구성품에 할당하는 것으로 시스템의 계

층 구조를 고려하지 않고 할당하는 모형이며, 가중 변수  $\omega_i$ 는 식(5)와 같다.

$$\omega_i = \frac{1}{\text{전체 구성품 수}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

하부시스템에 의한 균등 할당 모형은 하부시스템에 의해서 전체 시스템의 고장률을 할당하는 모형으로 가중 변수  $\omega_i$ 는 식(6)과 같다.

$$\omega_i = \frac{1}{\text{하부시스템의 수}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

### 2.1.3 Base 할당 모형

Base 할당 모형은 시스템의 목표 고장률이나 평균고장시간 목표 값을 가지고 비중이나 기여도를 나타내는 가중 변수를 고려하여 하부시스템의 고장률을 할당하는 모형으로 식(7)과 같다.

$$\lambda_i = \omega_i \cdot \lambda_{system}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$\lambda_{system}$  : 전체 시스템의 고장률,

$\lambda_i$  : 하부시스템  $i$ 의 고장률,

$\omega_i$  : 표준화된 하부시스템의 가중 변수

Base 할당 모형은 표준화된(Normalized) 할당 모형과 비표준화된(Non-Normalized) 할당 모형으로 분류되는데, 표준화된 할당 모형은 하부시스템의 가중 변수들은 0~1사이의 값을 가지고, 시스템의 가중 변수의 합이 1이며, 이 가중 변수들이 전체 시스템의 비율로 표현되어 할당하는 방법이다. 비표준화된 할당 모형은 가중 변수가 비표준화 되어 있는 경우이며, 식(8)을 이용하여 가중 변수를 표준화 한다.

$$\omega_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$W_i$  : 비표준화된 가중 변수,

$w_i$  : 표준화된 가중 변수

#### 2.1.4 AGREE 할당 모형(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment Allocation)

항공기 시스템에 활용하기 위하여 제안된 AGREE 할당 모형은 장비의 고장률보다는 오히려 장비의 복잡성에 기초를 두고 있다. 또한 시스템의 고장과 관련된 장비의 중요도를 비롯하여 특성까지도 AGREE 방법에서는 고려하고 있다. AGREE 할당 모형은 시스템 신뢰도를 만족하기 위하여 각 장비에 최소한의 평균수명을 할당하는 데 사용된다.

AGREE 할당 모형에서  $j$ 번째 장비에 할당된 고장률은 식(9)와 같이 표현되며,  $x$  값이 작아지면 근사적으로  $e^{-x} \cong 1-x$ 이므로, 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_i = \frac{n_i [-\ln R^*(T)]}{N \omega_i t_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$R_i(t) = 1 - \frac{1 - [R_{system}(T)]^{n_i/N}}{\omega_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

- $R_{system}(T)$  : 전체 시스템의 신뢰도,
- $R_i(t)$  : 하부시스템  $i$ 의 신뢰도,
- $\lambda_i$  : 하부시스템  $i$ 의 고장률,
- $n_i$  : 하부시스템  $i$ 의 모듈 개수,
- $N$  : 하부시스템의 전체 모듈 개수,
- $\omega_i$  : 임무에 미치는 영향 확률, 가중 변수,
- $t_i$  : 하부시스템  $i$ 의 작동시간 ( $0 < t_i \leq T$ )

#### 2.1.5 ARINC 할당 모형(Aeronautical Radio Incorporated apportionment technique)

ARINC 할당 모형은 경험 자료나 예측치를 활

용하여 신뢰도를 할당하는 방법으로 직렬 구조를 갖는 시스템에만 적용이 가능하며, 다음의 세 가지 가정을 만족해야 한다.

첫째, 전체 시스템은 일정한 고장률을 갖는 직렬 구조의 하부시스템들로 이루어진다.

둘째, 각 하부시스템의 고장은 전체 시스템의 고장으로 이어진다.

셋째, 하부시스템의 임무시간은 전체 시스템의 임무시간과 일치한다.

전체 시스템의 고장률은 식(11)과 같다.

$$\lambda_{system} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n \quad (11)$$

전체 시스템 고장률이 목표 고장률 보다 크면 전체 시스템의 고장률을 낮추기 위해 각 하부시스템의 고장률은 적절하게 감소되어야 하며, 가중 변수  $w_i$ 는 식(12)와 같이 구할 수 있다.

$$w_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_{system}} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$w_i$  : 하부시스템  $i$ 의 가중 변수,

$\lambda_i$  : 하부시스템  $i$ 의 고장률

각 하부시스템의 개선될 고장률은 식(13)과 같다.

$$\bar{\lambda}_i = w_i \cdot \lambda^*, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$\bar{\lambda}_i$  : 하부시스템  $i$ 의 개선될 고장률,

$\lambda^*$  : 목표 고장률

#### 2.1.6 혼합 할당 모형(Mixed Allocation)

혼합 할당 모형은 가중 변수를 이용하여 두 가지 이상의 할당 모형을 혼합하는 모형이다. 식(14)는 균등 할당 모형과 ARINC 할당 모형을 혼합한 모형으로 두 가지 할당 모형을 통해 할당된 하부

시스템 고장률을 각각  $\lambda_{Equal}$ 과  $\lambda_{ARINC}$ 라고 할 때, 가중 변수  $k$ 를 이용하여 혼합한 모형이다.

$$\lambda_{Mixed} = k \cdot \lambda_{Equal} + (1-k) \cdot \lambda_{ARINC} \quad (14)$$

- $\lambda_{Mixed}$  : 혼합 할당 모형 고장률,
- $\lambda_{Equal}$  : 균등 할당 모형으로 할당된 하부시스템 고장률,
- $\lambda_{ARINC}$  : ARINC 할당 모형으로 할당된 하부시스템 고장률,
- $k$  : 가중 변수

### 2.1.7 목표 실현성을 고려한 할당 모형 (Feasibility-of-Objectives Allocation)

목표 실현성을 고려한 할당 모형은 수리를 하지 않는 기계-전기 시스템 신뢰도를 할당하는 모형이다. 하부시스템에 신뢰도를 할당할 때 평가해야 할 요소로는 시스템의 복잡성, 적용 기술수준, 작동시간 및 사용 환경이 있다. 평가자의 지식과 경험 또는 델파이 기법과 같은 전문가 그룹의 설문조사를 통해 이러한 고려요소를 1~10의 수치로 평가하는데 평가 기준은 <표 1>과 같다.

<표 1> 하부시스템의 평가 요소 및 기준

평가요소	평가 기준
복 잡 도 ( $r_1$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 구성하는 부품의 수로 계산</li> <li>• 복잡할수록 10에 가까움</li> </ul>
기술수준 ( $r_2$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 설계에 사용되는 기술의 최신화 수준</li> <li>• 최신 기술일수록 10에 가까움</li> </ul>
작동시간 ( $r_3$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시스템의 작동 시간</li> <li>• 임무 시간에 비교하여 작동시간이 길수록 10에 가까움</li> </ul>
사용환경 ( $r_4$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사용되는 경우의 주위 환경 정보</li> <li>• 열악한 환경일수록 10에 가까움</li> </ul>

각 평가요소별 평가치의 합이 1이 되도록 표준화하고, 각 하부시스템 평가요소의 평가치를 곱하

며, 식(15)와 같이 이를 전체 시스템에서의 비율로 나타낸 것이 가중 변수이다.

$$\omega_i = \frac{r_{1i}r_{2i}r_{3i}r_{4i}}{\sum_{i=1}^n (r_{1i}r_{2i}r_{3i}r_{4i})}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

하부시스템의 고장률은 식(16)과 같이 전체 시스템의 고장률에 가중 변수를 곱하여 계산한다.

$$\lambda_i = \omega_i \lambda_{system}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

- $\lambda_{system}$  : 전체 시스템의 고장률,
- $\lambda_i$  : 하부시스템  $i$ 의 고장률,
- $\omega_i$  : 가중 변수

하부시스템에 할당된 신뢰도는 식(17)과 같다.

$$R_i = (R_{system})^{\omega_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

- $R_{system}$  : 전체 시스템의 신뢰도,
- $R_i$  : 하부시스템  $i$ 의 신뢰도,
- $\omega_i$  : 가중 변수

### 2.1.8 Albert 할당 모형

Albert 할당 모형은 노력을 최소화하는 할당 모형(Minimization-of-Effort Allocation)이라고도 하며, 시스템의 신뢰도 요구조건을 만족시키기 위한 전체적인 노력이 최소화 되도록 하는 것이다. 이 방법은 직렬 구조를 갖는 시스템을 위하여 제안되었지만 일반적 구조를 갖는 시스템에도 적용이 가능하다.  $n$ 개의 하부시스템이 직렬 구조로 연결된 시스템을 가정하면, 전체 시스템의 신뢰도는 식(18)과 같다.

$$R_{system} = \prod_{i=1}^n R_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

- $R_{system}$  : 전체 시스템의 신뢰도,
- $R_i$  : 하부시스템  $i$ 의 신뢰도

$R^*$ 를 전체 시스템의 요구 신뢰도라고 하면  $R_i > R^*$ 가 된다.  $R^*$ 를 만족시키기 위해서는  $R_i$  중에 적어도 하나의 하부시스템은 신뢰도 값을 증가시키는 노력이 필요하며, 노력 함수(Effort Function)  $G(R_i, R_i^*)$ 를 이용하여 하부시스템  $i$ 의 신뢰도를  $R_i$ 에서  $R_i^*$ 로 증가시키는데 소요되는 노력의 양을 측정한다. 노력을 최소화시킬 수 있는  $R_i^*$ 는 식(19)를 이용하여 계산한다.

$$\sum_{i=1}^n G(R_i, R_i^*), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

$R_i$  : 하부시스템  $i$ 의 신뢰도,  
 $R_i^*$  : 하부시스템  $i$ 의 개선될 신뢰도

이때의 조건은 식(20)과 같으며, 식(21)과 같은 고유의 해를 구할 수 있다.

$$\prod_{i=1}^n R_i^* = R_{system}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

$$R_i^* = \begin{cases} R_0^* & \text{if } i \leq K_0 \\ R_i & \text{if } i > K_0 \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

$R_0^*$  : 개선될 최대 신뢰도,  $K_0 : i + 1 = j$

하부시스템 신뢰도를  $R_1 < R_2 < \dots < R_n$ 이 되도록 하부시스템의 번호를 다시 부여하고, 식(22)를 이용하여 계산한다.

$$r_j = \left[ \frac{R^*}{\prod_{i=j+1}^{n+1} R_i} \right]^{1/j} \quad (22)$$

만약  $R_j > r_j$ 이면 하부시스템  $j$ 의 신뢰도는 초기 값인  $R_j$ 로 한다.  $j = k_0$ 에서부터  $R_j < r_j$ 이면 하부시스템  $j(j = 1, 2, \dots, k_0)$ 의 초기 신뢰도  $R_j$ 를  $r_j$ 로 개선시킨다.

## 2.1.9 중요도에 의한 할당(Weight allocation)

중요도에 의한 할당 모형은 상대 고장률, 상위 단계로의 고장 파급도, 동작 시간비 등을 가중 변수에 포함하여 할당하는 방법이다. 상위 단계로의 고장 파급도는 구성품 내에 머무르는 국부적인 고장, 상위 단계에 미치는 고장 등 여러 가지가 있으므로 고려하며, 동작 시간비는 지속적으로 동작하고 있는 구성품과 필요시에만 동작하는 구성품이 있으므로 고려한다.

$n$ 개의 하부시스템으로 이루어진 시스템에서 각 하부시스템의 추정 고장률을  $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 라 하고, 시스템의 평균 고장 시간(MTTF) 목표 값을  $\theta_N$ 으로 한다. 기존 시스템의 고장률은 식(23)과 같고, 상대 고장률에 의한 가중 변수는 식(24)와 같다.

$$\lambda_0 = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n \quad (23)$$

$$\omega_i = \frac{\lambda_0}{\lambda_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

상위 단계로의 고장 파급도 가중 변수는 식(25)와 같다.

$$\omega_S = \frac{1 + \frac{\lambda_S}{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^n (1 + \frac{\lambda_S}{\lambda_i})}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (25)$$

$\omega_S$  : 상위 단계로의 고장 파급도 가중 변수,  
 $\lambda_S$  : 하부시스템  $i$ 의 고장으로 파급되는 시스템의 고장률

동작 시간비 가중 변수는 식(26)과 같다.

$$\omega_{t_i} = \frac{1 + \frac{t_i}{T}}{\sum_{i=1}^n (1 + \frac{t_i}{T})}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

$\omega_i$  : 동작 시간비 가중 변수,  
 $T$  : 시스템의 총 운전시간,  
 $t_i$  : 하부시스템  $i$ 가 실제로 작동하는 시간

총합된 가중 변수는 식(27)과 같다.

$$w_i = \sum_{i=1}^n (w_{f_i} \cdot w_{s_i} \cdot w_{t_i}) w_{f_i} \cdot w_{s_i} \cdot w_{t_i},$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

이때  $\theta_N = \theta_N w_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 으로 할당한다.

### 2.1.10 가용도 및 정비도를 고려한 할당 모형 (Repairable System Allocation)

가용도 및 정비도를 고려한 할당 모형은 균등 할당 모형과 유사하며, 전체 시스템에 균등하게 가용도를 할당하는 방법이다. 가용도 및 정비도를 고려한 할당 모형에서는 요구 가용도를 입력하고, 가중 변수는 입력하지 않는다. 대신에 시스템 구조 내의 전체 평균 수리 시간(MTTR) 중에서 평균 고장간 시간을 포함하고 있으며, 평균 수리 시간은 고장률의 계산으로 얻어질 수 있다.

가용도의 계산식은 식(28)과 같다.

$$\text{가용도} = (\text{시스템 요구 가용도})^{1/n} \quad (28)$$

$n$  = 하부시스템의 개수

고장률의 계산식은 식(29)와 같다.

$$\text{가용도} = \frac{MTTR}{\text{고장률} + MTTR}$$

$$\text{고장률} = \frac{MTTR}{\text{가용도}} - MTTR \quad (29)$$

$$\text{고장률} = \left( \frac{1}{\text{가용도}} - 1 \right) \cdot MTTR$$

### 2.1.11 유사 장비를 이용한 할당 모형 (Similarity Method)

유사 장비를 이용한 할당 모형은 기존에 개발되어 운영하고 있는 유사한 수준의 장비를 이용하여 할당하는 것이다. 유사 장비의 운영 자료를 수집한 후 고장률과 신뢰도를 산출하여 하부시스템에 할당하는 모형이다.

### 2.1.12 고객 지향 할당 모형 (Customer-Driven Allocation)

고객 지향 할당 모형은 고객의 기대에 부합하는 시스템을 생산하기 위하여 신뢰도를 할당하는 방법이다. 시스템이  $n$ 개의 하부시스템으로 구성되어 있고, 각 하부시스템이 독립적인 성능 특성을 가지고 있을 때 고객의 기대에 대한 만족도를 달성하기 위하여 하부시스템에 목표 신뢰도를 할당한다.

### 2.1.13 Bracha 할당

신뢰도 할당을 위하여 하부시스템의 복잡도, 기술수준, 작동시간, 사용 환경을 고려하며, 하부시스템의 고장이 지수분포이고, 직렬 시스템으로 가정한 할당 모형으로 식(30)과 같다.

$$I_i = A_i (C_i + E_i + T_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

$$\omega_i = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^n I_i}$$

$$R_i^* = (R_{system})^{\omega_i}$$

$\omega_i$  : 하부시스템  $i$ 의 가중 변수,

$I_i$  : 하부시스템 Index,

$C_i$  : 복잡도 Index,

$E_i$  : 사용 환경 Index,

$T_i$  : 작동시간 Index

Index 계산방법은 <표 2>와 같다.

<표 2> Bracha 할당 모형의 Index 계산방법

기술수준	복 잡 도	사용 환경	작동시간
$A = K^v$	$C = 1 - e^{-K_0 + 0.6K_p}$	$E = 1 - \frac{1}{f}$	$T = \frac{T_m}{T_u}$

$f$  : 스트레스(Stress), 0~100,  
완전고장유발 스트레스 : 100,  
고장의 유발이 없는 스트레스 : 0,

$K_i$  :  $\lambda_i K_{bi} / \sum_{j=1}^n \lambda_j K_{bj}$ ,

$K_{bi}$  :  $10n_{bi} / n_{pc}$ ,

$n_{bi}$  : 하부시스템의 부품 수,

$n_{pi}$  : 하부시스템의 중복 부품 수,

$n_{pc}$  : 가장 복잡한 하부시스템의 중복 부품 수,

$T_m$  : 총 임무시간,

$T_0$  : 기준일 이후 경과 기간(년),

$T_u$  : 하부시스템의 작동시간,

$T_w$  : 기준일 이후 하부시스템의 작동기간(년),

$a$  : 하부시스템 신뢰도의 최신기술 영향,

$\bar{a}$  :  $a + T_0 \Delta a$ ,

$\lambda_i$  : 하부시스템  $i$ 의 고장률

#### 2.1.14 Karmiol 할당

Karmiol 할당 모형에서는 다음 요소들의 영향을 고려한다.

- Complexity ( $C$ )
- State of Art Technology ( $A$ )
- Operative Profile ( $O$ )
- Criticality ( $C_r$ )

Karmiol 할당 모형은 위 요소들의 합이나 곱으로 특정 값을 산출한 후 이 값을 토대로 하여 각 하부시스템들에 적정 신뢰도를 할당하는 방법이다. 이 방법은 하부시스템들의 신뢰도 및 고장률

에 관한 과거 자료가 없는 새롭게 개발되는 시스템에 효과적으로 활용 될 수 있으며, 시스템 개발의 전 단계에 적용이 가능하다. 그러나 요소들의 값 결정시 전문가나 신뢰도 엔지니어의 주관에 개입될 여지가 있으므로 객관적인 할당 결과를 기대할 수 없다.

#### 2.1.15 Integrated Factors 할당

Integrated Factors 할당 모형은 항공기 개발의 설계단계에서 각 하부시스템에 신뢰도를 할당하기 위하여 제안되었으며, 다음의 4개 요소를 설정하였다.

- Criticality index ( $C$ )
- Complexity index ( $K$ )
- Functionality Index ( $F$ )
- Effectiveness Index ( $O$ )

위 요소의 Index 값은 전문가의 판단에 따라 정해지는데 하부시스템  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )의 Global Index는 식(31) 및 식(32)와 같다.

$$IG_i = \frac{k_i \cdot F_i \cdot O_i}{C_i} \quad (31)$$

$$IG_i(\%) = \frac{IG_i}{\sum_{i=1}^N IG_i} \quad (32)$$

$IG_i(\%)$ 를 토대로 각 하부시스템에 목표 신뢰도를 할당한다. Integrated Factors 할당 모형은 Karmiol 할당 모형과 마찬가지로 과거 신뢰도 자료나 고장률 자료가 없는 새로운 시스템의 신뢰도 할당에 효율적으로 활용될 수 있으나 할당 결과가 전문가의 주관에 따라 달라질 수 있는 단점이 있다.

위의 15개 신뢰도 할당 모형들을 비교하면 <표 3>과 같다.



<표 3> 신뢰도 할당 모형 비교

모형	적용 시스템	기존/ 유사 장비 정보	비용 요소	가중 변수	정비 요소	신뢰도 우선 순위
Simple	직렬	×	×	×	×	×
Equal	직렬	×	×	×	×	×
Base	혼합	○	×	○	×	×
AGREE	혼합	○	×	○	×	○
ARINC	직렬	○	×	○	×	○
Mixed	혼합	○	×	○	×	×
Feasibility	혼합	○	×	○	×	○
Albert	직렬	×	×	○	×	○
Weight	혼합	×	×	○	×	○
Repairable	직렬	×	×	×	○	×
Similarity	혼합	○	×	×	×	×
Customer	혼합	×	×	×	×	○
Bracha	직렬	×	×	○	×	○
Karmiol	혼합	×	×	○	×	○
Integrated	혼합	×	×	○	×	○

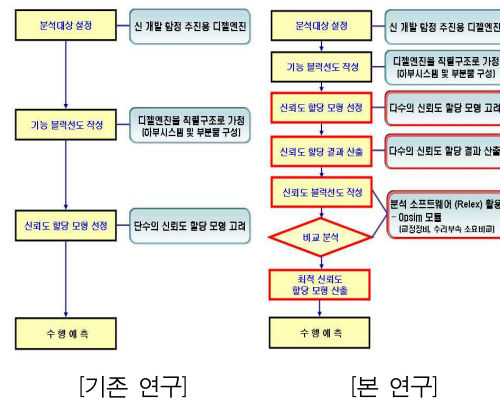
## 2.2 기존 연구 검토

신뢰도 할당에 관한 연구는 주로 유사체계나 장비의 운영 자료를 바탕으로 연구되어졌다.

Domenico F. et al.(2002)은 항공기 개발의 설계단계에서 각 구성품의 신뢰도 할당을 위하여 Integrated Factors 할당 모형을 제안하였으며, 한지희(2007)는 유도탄 개발시 신뢰도 할당은 유사 장비 경험 자료를 활용한 고장자료가 전자부품의 고장률만을 고려하고, 비 전자부품에 대한 고장률을 고려하지 않기 때문에 이를 보정하기 위해서 유사장비의 전자부품의 고장률에 따른 ARINC 할당 모형의 결과와 균등 할당 모형을  $k$ 가중 변수를 활용하여 혼합한 혼합 할당 모형을 제안하였다. LIG 넥스원 ILS 연구센터(2006~2007)에서는 요격 미사일의 신뢰도 할당 방법으로 설계변경 등을 고려하여 설계 목표 값(80%)을 설정한 단순

할당과 유사 체계인 패트리엇 미사일의 자료를 바탕으로 한 ARINC 할당 모형을 복합적으로 사용하는 방법을 적용하였고, 해군음향정보관리체계는 유사 체계의 부재로 균등 할당 모형을 적용하였으며, 함정용 음탐기 체계는 유사 체계인 예인식 음탐기 체계의 자료를 이용한 ARINC 할당 모형을 적용하였다.

이와 같이 무기체계 및 장비개발 과정에서 신뢰도 할당 모형의 선정 방법의 부재로 인하여 적용된 신뢰도 할당 모형이 개발체계에 적합한 모형인지 확인할 수 없었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 각각의 할당 모형의 검토를 통하여 신뢰도 할당 결과들을 시뮬레이션 함으로써 운영유지비용과 같은 ILS 소요를 판단하면 최적의 신뢰도 할당 모형과 결과를 도출 할 수 있을 것이다. 기존 및 본 연구에서 제안하는 신뢰도 할당 절차는 <그림 2>와 같다.



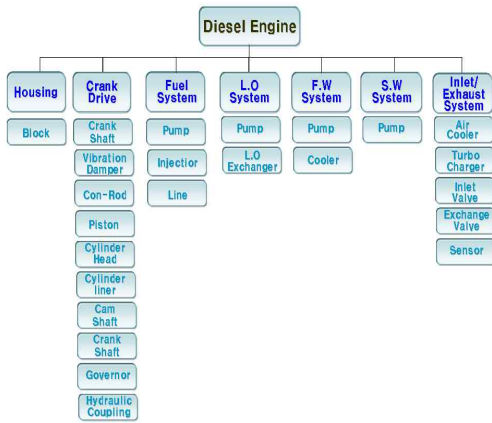
<그림 2> 기존 연구 및 본 연구 제안 신뢰도 할당 절차

## 3. 유사 장비의 고장자료 분석

### 3.1 대상 장비 및 자료 수집

고장자료의 수집은 현재 해군 함정에서 운영하고 있는 MTU12V956 디젤 엔진을 대상으로 하였다. MTU12V956 디젤 엔진은 <그림 3>과 같이

엔진 내부를 보호하는 Housing, 실린더 내부의 연소를 통하여 Cam-Shaft까지 힘을 전달해 주는 Crank Drive, 엔진 전체에 연료를 공급해주는 Fuel System, 엔진 전체에 윤활유를 공급해주는 L.O System, 엔진 내부를 냉각시켜주는 F.W System, 엔진 내부를 냉각시킨 냉각수를 해수로 열교환해 주는 S.W System, 연소를 위해 실린더에 공기를 공급하고 연소가 완료된 폐기를 밖으로 배출하는 Inlet/Exhaust System의 7개 하부시스템으로 구성된 동력 발생 시스템이다.

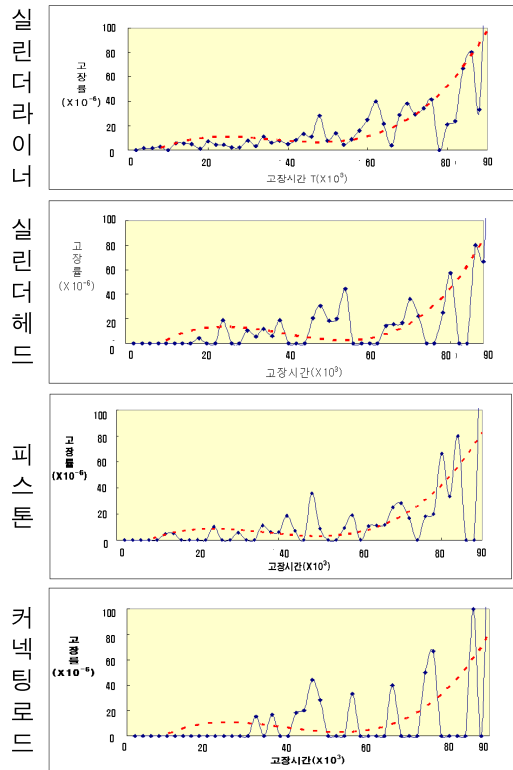


<그림 3> 함정용 디젤 엔진 계층 구조

본 연구에서는 대상 장비의 운영 자료를 바탕으로 RAM 자료를 산출하였다. 운영 자료는 2005년부터 2008년까지 41개월간 73대 엔진의 주요 구성품별 도입년도 및 고장 발생 자료를 수집하여 분석하였다.

### 3.2 고장자료 분석

고장자료를 분석한 결과 주요 하부시스템의 고장자료가 일정고장률(CFR, Constant Failure Rate) 형태를 나타내며 지수분포를 따른다는 것을 확인하였다. <그림 4>는 그림은 MTU12V956 디젤 엔진 Crank Drive 주요 부품의 고장시간 대 고장률을 나타낸 것으로 약 6,000시간이 되는 시점에서 점차 고장률이 증가함을 알 수 있었다.



<그림 4> Crank Drive 주요 부품의 고장시간 대 고장률

<표 4> MTU12V956 디젤 엔진 부품별 고장자료 분석 결과

구분	Housing	Crank Drive	Fuel System	L.O System	F.W System	S.W System	Inlet/Exh'Sys'	결과값
고장률(λ)	0.210	16.350	40.080	10.090	22.440	4.920	23.250	117.340
MTBF(hour)	4,761,904	61,162	24,950	99,108	44,563	203,252	43,010	8,522
비율(%)	0.18	13.93	34.16	8.60	19.12	4.19	19.82	100

MTU12V956 디젤 엔진의 부품별 고장자료를 분석한 결과는 <표 4>와 같으며, 연료를 공급하는 Fuel System, 엔진을 냉각하는 F.W System, 연소를 위한 흡기와 배기를 수행하는 Inlet/Exhaust System의 고장이 자주 발생하는 것으로 분석하였다.

#### 4. 신뢰도 할당 모형의 선정

##### 4.1 분석 장비

현재 우리나라는 군수용 엔진의 개발 실적이 없지만 개발 기술이 민수용 디젤 엔진을 개발 및 생산하여 수출하고 있는 능력에 있으므로 군수용 엔진의 개발 가능성이 있다. 또한 면허생산비 및 군수장비의 품질, 부품의 수입비용을 고려 할 때 국산 신형 디젤 엔진의 개발이 필요하므로, 차기 개발 함정용 디젤 엔진을 가정하고 분석하였다.

차기 개발 함정용 디젤 엔진은 기존의 유사장비인 MTU12V956 디젤 엔진과 동일한 구성 및 주요기능을 나타내는 것으로 가정하였으며, 신뢰도 목표 값은 <표 5>와 같이 국방규격서와 동일하게 9,000시간( $\lambda=111.111$ )으로 설정하였다.

<표 5> 함정용 디젤 엔진 신뢰도 목표 값

구 분	MTBF
MTU12V956 (MTU사 제시, 국방규격서)	9,000시간 ( $\lambda=111.111$ )
MTU12V956 (고장 자료 분석 결과)	8,522시간 ( $\lambda=117.340$ )
차기 개발 함정용 디젤 엔진	9,000시간 ( $\lambda=111.111$ )

<표 6> 디젤 엔진 전자 및 기계부품 고장률

분 류	품 목 수	고 장 률	비 율
전자부품	756	34.2500	14.59%
기계부품	1,182	200.4154	85.41%

##### 4.2 신뢰도 할당

차기 개발 함정용 디젤 엔진의 신뢰도 할당을 위해 본 연구에서는 앞에서 언급한 기존의 신뢰도 할당 모형을 이용하여 디젤 엔진의 7개 하부시스템에 대하여 수행하였다. 가용도 및 정비도를 고려한 할당 모형에서 시스템의 요구 가용도는 0.98, 평균 수리 시간은 MTU12V956 디젤 엔진

<표 7> 신뢰도 할당 결과

구 분	Housing	Crank Drive	Fuel System	L.O System	F.W System	S.W System	Inlet/ Exh'Sys'	목 표 고장률
Equal Component	4.630	46.296	13.889	9.259	9.259	4.630	23.148	111.111
Equal Subsystem	15.873	15.873	15.873	15.873	15.873	15.873	15.873	111.111
Base Non-norm.	10.101	30.303	30.303	10.101	10.101	10.101	10.101	111.111
Base Norm.	11.111	31.838	23.718	11.111	11.111	11.111	11.111	111.111
AGREE	0.411	24.278	32.971	7.513	13.296	9.629	23.013	111.111
ARINC	0.199	15.487	37.951	9.551	21.254	4.662	22.007	111.111
Mixed	2.486	15.543	34.730	10.473	20.469	6.298	21.112	111.111
Feasibility	1.483	34.820	39.781	14.061	4.372	5.124	11.470	111.111
Repairable	0.201	15.053	37.324	9.865	21.028	4.824	22.816	111.111
Similarity	0.210	16.350	40.080	10.090	22.440	4.920	23.250	117.340

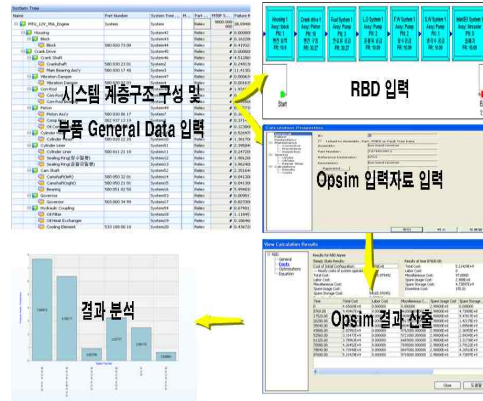
의 평균 수리 시간을 적용하였다. 혼합 할당 모형에서는 하부시스템에 의한 균등 할당 모형과 ARINC 할당 모형을 혼합하였으며, 가중변수 k는 <표 6>과 같이 디젤 엔진의 전자부품과 기계부품의 산출된 고장률 자료를 활용하여 할당하였다.

차기 개발 함정용 디젤 엔진에 적용 가능한 10개 할당 모형을 이용하여 산출한 결과는 위의 <표 7>과 같다.

### 4.3 최소 운영유지 비용 산출

10개의 신뢰도 할당 모형을 이용하여 결과를 산출하였으나, 어떤 결과가 적합한지를 판단하기란 어려운 일이다. 본 연구에서는 객관적인 판단을 위하여 운영유지비용에 기준을 두고, 신뢰도 할당 결과들을 비교하였다. 이를 위해서 기존의 신뢰도 프로그램인 Relex의 시뮬레이션 기능을 수행하는 Opsim을 사용하여 <그림 5>와 같이 최소 운영유지 비용을 산출하였다.

<표 7>의 할당 결과들을 가지고 신뢰도 블록선도(RBD)를 구성한 후 정비 비용, 정비 인원, 교정 정비, 예방 정비, 주기 검사, 야전/창 정비 및 저장 비용을 포함하여 입력하였다. 입력 자료를 바탕으로 신뢰도 할당 모형의 결과들로 작성된 신뢰도 블록선도를 Relex Opsim에 적용하여 결과를 산출하였다.



<그림 5> 최소 운영유지 비용 산출 절차

<표 8> 운영유지 비용 산출 결과(단위 : 백만원)

구 분	Labor Cost	Spare Cost	Storage Cost	Downtime Cost	운영유지 비용
Equal Component	159.5	4,374	157.6	156	4,847.1
Equal Subsystem	159.6	5,104	153.3	172	5,588.9
Base Non-norm.	184.7	5,104	182.3	143	5,614.0
Base Norm.	174.3	5,104	168.7	139	5,586.0
AGREE	159.7	4,739	160.3	155	5,214.0
ARINC	183.6	5,469	178.4	154	5,985.0
Mixed	168.3	5,469	162.1	154	5,953.4
Feasibility	169.6	5,103	168.1	126	5,566.7
Repairable	179.8	4,756	173.4	156	5,265.2
Similarity	163.3	4,738	163.1	157	5,221.4

<표 9> 구성품에 의한 균등 할당 모형을 이용한 신뢰도 할당 결과

구 분	Housing	Crank Drive	Fuel System	L.O System	F.W System	S.W System	Inlet/Exh'Sys'	결 과 값
고 장 륜( $\lambda$ )	4.630	46.296	13.889	9.259	9.259	4.630	23.148	111.111
MTBF(hour)	215,982	21,600	71,999	108,003	108,003	215,982	43,200	8,522
비 율(%)	4.17	41.67	12.50	8.33	8.33	4.17	20.83	100

#### 4.4 결과 분석

각각의 신뢰도 할당 결과들을 신뢰도 블록선도로 가상 시스템을 구성하고, 차기 개발 함정용 디젤 엔진을 10년간 중단하지 않고 운전하는 것으로 가정하였다. Relex Opsim을 이용하여 운영유지비용을 산출한 결과는 <표 8>과 같다.

신뢰도 할당 모형 중 구성품에 의한 균등 할당 모형으로 신뢰도를 할당한 경우의 운영유지 비용이 약 48억 원으로 가장 적은 운영유지 비용이 소요되는 것으로 도출되었다.

최소의 운영유지 비용이 소요되는 구성품에 의한 균등 할당 모형에 따라 차기 개발 함정용 디젤 엔진의 하부시스템의 신뢰도를 할당한 결과는 <표 9>와 같다.

각 서브시스템의 구성품은 총 24개로 이루어져 있으며, 각 구성품에 할당된 고장률은 4.630이다. 10개의 구성품으로 이루어진 Crank Drive가 전체의 41.67%로 가장 높게 할당되었으며, 각 서브시스템의 구성품 수에 의하여 Inlet/Exh'Sys', Fuel System 순으로 높게 할당되었다.

본 연구의 결과는 해군에서 운영하고 있는 디젤 엔진 자료를 바탕으로 차기 개발 함정용 디젤 엔진을 대상으로 한 연구이며, 향후 각 군의 운영장비의 특성을 고려하여 적합한 신뢰도 할당모형을 선정하는 방법의 개발이 시급하다.

#### 5. 결론

지금까지 무기체계 및 장비개발 과정에서 적용해야 할 신뢰도 할당 모형의 선정 방법의 부재로 인하여 어떤 신뢰도 할당 모형이 체계에 적합한 모형인지 확인할 수 없었다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기존에 연구되거나 사용되고 있는 다수의 신뢰도 할당 모형을 이용하여 신뢰도를 할당하고, 운영 자료를 활용한 시뮬레이션을 수행하여 운영유

지비용을 최소화하는 신뢰도 할당 모형을 선정하였다.

대부분의 신뢰도 할당은 시스템 설계나 개발 초기 단계에서 정보가 부족하기 때문에 어려움을 겪고 있으나, 보다 현실적인 신뢰도 목표 값을 설정하기 위해서는 개발 초기 단계에서부터 신뢰도를 할당하고, 철저한 신뢰도 관리를 통해 신뢰도 요구조건을 충족시킬 수 있는 방안을 강구해야 하며, 지속적으로 재할당 과정을 수행해야 보다 적합한 신뢰도 목표 값을 도출할 수 있을 것이다.

신뢰도 할당 모형을 선정함에 있어 개발과정에서 이루어지는 기능 추가나 시스템 디자인 변경 등의 상황을 종합적으로 고려하고, 체계개발 이후의 장비 운용 가동률과 실제 운영유지비의 상관관계를 고려한 신뢰도 할당 모형의 선정 절차에 대한 연구가 필요할 것이다.

#### 참고문헌

- [1] AGREE, "Reliability of Military Electronic Equipment," Office of the Assistant Secretary of Defence Research and Engineering, Advisory Group of Reliability of Electronic Equipment, Washington DC., 1957.
- [2] Alan, F. Estevez, "The Future Logistics Enterprise," DoD logistics transformation, 2003.
- [3] Albert, A., "A Measure of the Effort Required to Increase Reliability," Technical Report 43, Applied Mathematics and Statistics Laboratory ; Stanford University, Stanford, 1958.
- [4] Bracha, V. J., "The Methods do Reliability Engineering", Machine Design, pp.70~76, 1964.
- [5] Domenico, F., Alessandro, S., and Gianpaolo, D. B., "Integrated factors method for reliability allocation : Application to an Aerospace

- Prototype Project,” Dept. of IE., Univ. of Cassino, Italy, 2002.
- [6] Drenick, R. F., “The Failure Law of Complex Equipment,” *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 8, No. 4, pp.680~690, 1960.
- [7] Englewood Cliffs, N. J., “Reliability Engineering,” Prentice Hall ARINC Research Corp., 1964.
- [8] Fugate, D. L., “A Reliability Allocation Method for Combination Serial-Parallel Systems,” *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp.432~435, 1992.
- [9] Han, J. H., “A Study on an Improvement of the Reliability Analysis for Shipboard Guided Weapon Systems,” Korea National Defense University, Master Thesis, 2007.
- [10] Kapur, K. C., and Lamberson, L. R., “Reliability in Engineering Design,” John Wiley & Sons, Inc., 1977.
- [11] Karmioli, E. D., “Reliability Apportionment Preliminary Report EIAM5 Task II,” General Electric Schenectady, N.Y., pp.10~22, 1965.
- [12] Kuo, W., Prasad, V. R., Tillman, F. A., and Hwang, C. L., “Optimal Reliability Design,” Cambridge University Press, 2001.
- [13] Mettas, A., “Reliability Allocation and Optimization for Complex Systems,” *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp.216~221, 2000.
- [14] Preston, R. M., “Reliability Toolkit,” Reliability Analysis Center, 2005.
- [15] Relex Studio, “Relex Studio Reference Manual,” Relex Software Corporation, 2007.
- [16] Richard, L. S., and James, T. M., “Probability and Statistics for Engineer,” Duxbury Press, 1995.
- [17] Wattanapongsakorn, N., “Integrating Dependability Analysis and Optimization into the Distributed Embedded System Design Process,” Ph.D., School of Electrical Engineering, University of Pittsburgh, 2000.
- [18] Yang, G., “Life Cycle Reliability Engineering,” John Wiley & Sons, Inc., 2007.

■ 저자 소개 ■

박 중 화(E-mail: pjhmarine@hanmail.net)

1998 해군사관학교 졸업(학사)  
2009 국방대학교 운영분석학과 졸업(석사)  
현재 해군 제2함대사령부  
관심분야 최적화, 신뢰도 분석, 의사결정

김 기 태(E-mail: navystar@hanmail.net)

1998 해군사관학교 졸업(학사)  
2008 국방대학교 운영분석학과 졸업(석사)  
현재 국방대학교 운영분석학과 박사과정  
관심분야 최적화, 경로문제 응용, 메타휴리스틱, 신뢰도

전 건 옥(E-mail: g0jeon01@yahoo.co.kr)

1984 공군사관학교 졸업(학사)  
1993 고려대학교 대학원 산업공학과 졸업(석사)  
1999 미국 Univ. of Louisville 산업공학과 졸업(박사)  
현재 국방대학교 운영분석학과 부교수  
관심분야 최적화기법 응용, 일정계획, 신뢰도 분석, 셀형 제조시스템