



Received: 2023/07/17
Revised: 2023/07/30
Accepted: 2023/08/14
Published: 2023/09/30

***Corresponding Author:**

Yangwoo Seo

PGM Integrated Product Support R&D Lab,
LIG Nex1
255, Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, Republic of Korea
Tel: +82-31-326-9255
Fax: +82-31-326-9001
E-mail: yangwoo.seo2@lignex1.com

복합무기체계의 신뢰도 모델링 설계 구현 방안

Study on the Implementation of Reliability Modeling Design for System of Systems

서양우^{1*}, 최대웅², 엄천섭³, 전동주³, 김소정³

¹LIG넥스원 PGM IPS연구소 수석연구원

²뉴빛테크놀로지 IPS사업본부 책임연구원

³LIG넥스원 PGM IPS연구소 선임연구원

Yangwoo Seo^{1*}, Daeung Choi², Chunsup Um³, Dongju Jeon³, Sojung Kim³

¹Chief research engineer, PGM Integrated Product Support R&D Lab, LIG Nex1

²Senior research engineer, Integrated Product Support Business Headquarters,
Newbit Technology

³Research engineer, PGM Integrated Product Support R&D Lab, LIG Nex1

Abstract

복합무기체계에 대한 신뢰도 모델링 설계 구현 방안을 제시하였다. 분석대상은 ○○복합무기 체계로 선정하였고, BlockSim S/W를 활용하여 신뢰도 블록 다이어그램을 작성하였다. 신뢰도 목표값 상향에 따른 신뢰도 모델링 설계에 대한 대안분석을 수행하였다. 신뢰도 80% 이상 만족하는 신뢰도 모델링 결과는 A 센서 장치의 9 중 6 구조 설계로 분석되었다. 신뢰도 90% 이상 만족하는 신뢰도 모델링 결과는 A 센서 장치의 9 중 6 구조 설계 및 E 감시 장치의 수동 병렬 삼중화 설계로 분석되었다.

A method for implementing a reliability modeling design for system of systems was presented. The analysis target was selected as the ○○ system of systems, and a reliability block diagram was prepared using BlockSim SW. Alternative analysis was performed on the reliability modeling design according to the increase of the reliability target value. The reliability modeling result satisfying 80% or more of reliability was analyzed by the of the 6 out of 9 redundancy design of A sensor equipment. The reliability modeling result satisfying 90% or more of the reliability was analyzed by 6 out of 9 redundancy design of A sensor equipment and standby redundancy design in three parallel elements of E supervisory equipment.

Keywords

신뢰도 모델링(Reliability Modeling),
중복(Redundancy),
복합무기체계(System of Systems),
신뢰도 블록 다이어그램(Reliability Block Diagram),
대안 분석(Alternative Analysis)

1. 서론

신뢰도 모델링은 신뢰도 블록 다이어그램 및 수학적 모델로 구성된 다[1]. 신뢰도 모델링을 수행하는 목적은 신뢰성을 평가하기 위한 수치 배분 및 추정을 위한 신뢰도 모델을 개발하는 것이다[2]. 신뢰도 블록 다이어그램은 기능 그룹 간의 상호의존성을 보여주기 위해 작성된다[3]. 신뢰도 블록 다이어그램은 시스템 입장에서 하위 시스템 및 구성품을 포함한 일련의 블록으로 표현한다. 시스템 성능에 미칠 것으로 예상되는 영향에 대해 정량적으로 평가할 수 있으며, 다양한 블록 조합을 통해 간결하게 시각적으로 볼 수 있다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 설계단계에서 수명 주기 비용의 85%가 결정됨을 알 수 있다[4]. 즉, 무기체계의 설계단계에서 최적의 설계를 수행 및 검증함으로써 실패비용 발생을 줄이는 것이 성공적인 전략이라고 할 수 있다.

또한, 국방 RAM 업무 제64조는 신뢰성·정비성 설계 업무를 정의하고 있다[5]. 신뢰성·정비성 설계는 RAM 목표값 달성을 위한 가장 근간이 되는 주요 업무이다[6]. 무기체계의 신뢰성 및 정비성 설계는 수명주기비용에 가장 큰 영향을 미친다. 고장 빈도 및 고장 수리 시간에 따라 시스템을 유지 관리하는데 필요한 자원이 결정되기 때문이다. 즉, 신뢰성 및 정비성 설계를 수행하기 전에 반드시 사전 필수 업무인 신뢰도 모델링 업무를 수행해야 한다. 따라서, 신뢰도 모델링을 통해

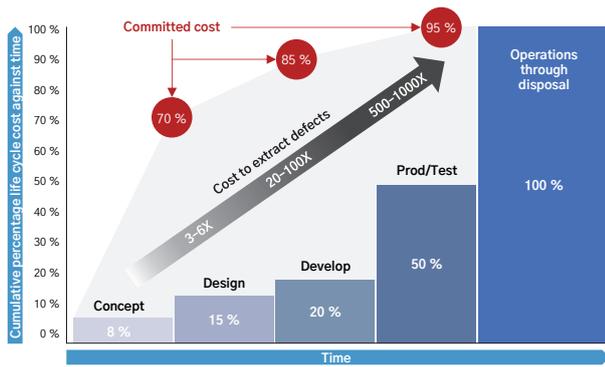


Fig. 1. Commitment life cycle cost against time that illustrates increasing cost of extracting defects with time[4]

이해관계자들의 합리적이고 효율적인 의사결정으로 무기체계의 최적 설계를 구현할 수 있다.

이에 따라, 본 논문은 복합무기체계에 대한 신뢰도 모델링 설계 구현 방안을 제시한다. 또한, 신뢰도 결과 대비 신뢰도 목표값 상향에 따른 신뢰도 모델링 설계에 대한 대안분석을 수행한다.

2. 신뢰도 블록 다이어그램

신뢰도 블록 다이어그램은 시스템의 구성요소가 신뢰성 측면에서 연결되는 방식을 그래픽으로 표현한 것으로 BlockSim[®] S/W를 활용하여 구현 가능하다[7]. 신뢰도 블록 다이어그램은 특정 신뢰도를 가진 작동 대상에 대한 정보를 논리적으로 구조화한 것을 의미한다. 이때, 연결된 블록도는 직렬, 병렬, 대기 및 n 중 k 구조로 구성할 수 있다[8]. 또한, 2개 이상의 구조를 조합은 물론 복잡한 구성도 정의 가능하다. 본 논문에서는 명시적으로 언급하지 않는 한 구성요소는 통계적으로 독립적으로 간주한다.

2.1 직렬 구조

직렬 구조는 하나의 구성요소가 고장이 발생하면 전체 시스템이 고장이 발생하는 경우이다. 대부분 시스템이 이러한 구조를 갖고 설계되는 경우가 많다. 직렬 시스템이 작동하기 위해서는 모든 구성요소가 정상적으로 작동해야 한다. 직렬 시스템의 신뢰도는 각 구성요소의 신뢰도 곱이며, 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$R_s(t) = [R_1(t)] \times [R_2(t)] \times \dots \times [R_n(t)] \quad (1)$$

여기서, t = 임무 시간,
 n = 총 장치 수량.

2.2 병렬 구조

병렬 구조는 모든 구성요소에 고장이 발생하면 전체 시스템 입장에서 고장이 발생하는 경우이다. 시스템이 작동하려면 구성요소 중 1개 이상이 정상 작동하면 된다. 병렬 시스템은 리턴턴시 장치로 시스템 설계 시 신뢰성 향상을 위한 구조이다. 병렬 시스템의 신뢰도는 n 개의 하부시스템에서 독립적으로 구성되고, 각 구성요소의 신뢰도를 알고 있으면 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$R_s(t) = 1 - [1 - R_1(t)] \times [1 - R_2(t)] \times \dots \times [1 - R_n(t)] \quad (2)$$

여기서, t = 임무 시간,
 n = 총 장치 수량.

2.3 대기 구조

대기 구조는 하나의 구성요소가 기능을 수행하다가 이것이 고장이 발생하면 여분의 구성요소가 그 기능을 인계받아 계속 기능을 수행하는 경우이다. 이 때, 여분의 구성요소는 초기에는 사용되지 않고 대기상태에 있게 된다. 대기 시스템의 신뢰도는 구성요소의 수량에 따라 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$R_s(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \quad (3)$$

여기서, t = 임무 시간,
 n = 병렬 구조에서 총 장치 수량,
 k = 고장 건수,
 λ = 장치 고장률.

2.4 n 중 k 구조

n 중 k 구조는 병렬 리턴턴시를 구성하는 특수한 경우이다. 모든 구성요소가 동일한 고장 분포를 가지며, 고장이 발생할 때마다 나머지 구성요소는 영향을 받지 않는 경우이다. 이러한 구성을 가지는 시스템의 신뢰도는 이항 분포를 사용하여 평가할 수 있다. n 중 k 구조는 n 개의 구성요소 중에서 적어도 k 개가 정상적

으로 작동하면 시스템이 작동하는 구조이며, 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$R_s(k, n, R) = \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} R^r (1 - R)^{n-r} \quad (4)$$

여기서, n = 병렬 구조에서 총 장치 수량,
 k = 시스템 작동을 위해 요구되는 장치의 최소 수량,
 R = 각 장치의 신뢰도.

3. 복합무기체계의 신뢰도 모델링 사례 분석

3.1 분석대상 선정

분석대상은 ○○ 복합무기체계로 선정하였다. 단, 방위산업 보안 업무 규정상 ‘○○ 복합무기체계’로 기술한다. ○○ 복합무기체계는 육상 및 해상에 설치되어 운용되는 시스템이다.

3.2 신뢰도 예측 수행

○○ 복합무기체계의 신뢰도 예측값을 Table 1과 같이 정리하였으며, 보안상 고장률 값에는 실제 예측값 및 임의의 값을 포함시켰다.

Table 1. Failure rates for sub-system of ○○ system of systems

Sub-system for ○○ system of systems	Failure rates (failures/10 ⁶ hours)
A sensor equipment	100
B receiving equipment	12
C interlocking equipment	23
D measuring equipment	4
E supervisory equipment	69
F supporting equipment	6

3.3 신뢰도 산출

Table 1을 활용하여 각 장치별 신뢰도를 산출하면 Table 2와 같다. 이때 연간운용시간은 1,600시간을 적용하였다. 예를 들어, A 센서 장치의 신뢰도를 산출하면 식 (5)와 같이 85.21%가 된다.

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-(100/1,000,000) \times 1,600} = 0.8521 \quad (5)$$

Table 2. Reliability of sub-system of ○○ system of systems

Sub-system for ○○ system of systems	Reliability (%)
A sensor equipment	85.21
B receiving equipment	98.10
C interlocking equipment	96.39
D measuring equipment	99.36
E supervisory equipment	89.55
F supporting equipment	99.04

3.4 신뢰도 모델링

○○ 복합무기체계에서 각각의 하부 장치들이 직렬로 설계되는 경우 BlockSim[®] S/W를 활용하여 신뢰도 블록 다이어그램을 도식화하면 Fig. 2와 같다.

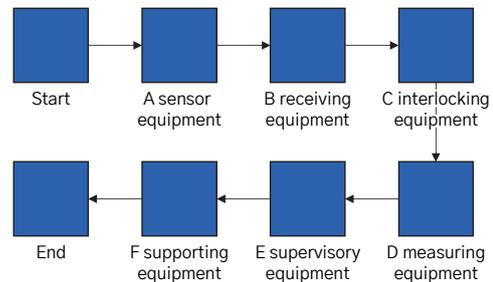


Fig. 2. Reliability block diagram for ○○ system of systems in single design and series structure

각각의 하부 장치들이 단일 설계이면서 직렬 구조인 경우로 ○○ 복합무기체계의 신뢰도는 식 (6)과 같이 71%로 산출되었다.

$$R_s(t) = [R_1(t)] \times [R_2(t)] \times \dots \times [R_n(t)] = 0.8521 \times 0.9810 \times 0.9639 \times 0.9936 \times 0.8955 \times 0.9904 = 0.7100 \quad (6)$$

수식으로 산출한 값과 BlockSim[®] S/W를 적용했을 때 결과값은 Fig. 3와 같이 동일함을 볼 수 있다.

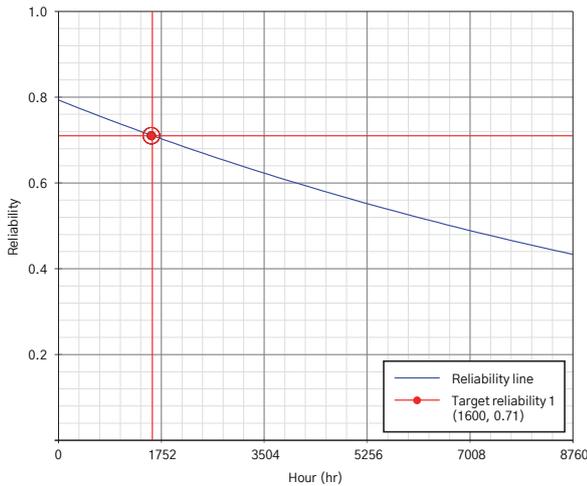


Fig. 3. Reliability vs. time of OO system of systems in single design and series structure

3.5 신뢰도 모델링 구현 방안 제시

기(既) 예측된 OO 복합무기체계의 신뢰도 71 %를 기준으로 신뢰도 80 % 및 90 % 이상을 만족할 수 있는 신뢰도 모델링 구현 방안을 제시한다. 이때, 중복 설계를 고려한 신뢰도 블록 다이어그램을 작성하여 신뢰도 최적화를 수행한다.

3.5.1 신뢰도 80 % 이상

직렬 설계에서 신뢰도를 향상시키기 위해서는 중복 설계를 고려해야 한다. 중복 설계에서는 신뢰도가 낮은 장치 순으로 선정 및 적용하여 시스템 신뢰도를 효과적으로 높여야 한다. 하지만 단순히 각각의 장치별로 중복 설계를 고려하기보다는 무기체계의 특성 및 임무를 고려한 적합한 중복 설계를 통해 최적의 설계를 구현하는 것이 바람직하다. 따라서, 신뢰도 모델링을 구현하기 전에 중복 설계 대상을 선정한 후 중복 설계 방법을 적용하도록 하였다.

신뢰도 모델링 적용 대상으로 OO 복합무기체계의 하부 장치 중 신뢰도 90 % 이하인 장치를 선정하였다. 이에 따라, A 센서 장치를 신뢰도 모델링 적용 대상으로 선정하였다. 또한, OO 복합무기체계의 특성을 고려하여 n 중 k 구조를 우선순위로 적용하였다.

A 센서 장치 1개의 신뢰도는 85.21 %이며, n 중 k 개의 중복 설계 구조인 신뢰도 모델링을 적용하였다. 단, n 개의 센서에서 $k = 6$ 인 조건을 가정하여 분석하였다. 즉, 이는 6개 센서가 정상 작동해야 하는 조건에 해당

된다. 예를 들어, 9개 중 6개가 정상인 경우 아래와 같이 신뢰도는 96.76 %로 산출되었다. 적어도 9개 이상 센서를 설치해야 식 (7)과 같이 신뢰도가 90 % 이상이 되는 것을 확인하였다.

$$\begin{aligned}
 R(6,9,0.8521) &= \sum_{r=6}^9 \binom{9}{r} 0.8521^r (1 - 0.8521)^{9-r} \\
 &= {}_9C_6 0.8521^6 (1 - 0.8521)^3 \\
 &\quad + {}_9C_7 0.8521^7 (1 - 0.8521)^2 \\
 &\quad + {}_9C_8 0.8521^8 (1 - 0.8521)^1 \\
 &\quad + {}_9C_9 0.8521^9 \\
 &= 0.9676
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

센서를 7개부터 10개까지 설치하였을 때, 6개 이상 센서가 정상인 경우 신뢰도 모델링을 수행한 결과는 Table 3와 같다.

Table 3. Reliability of k out of n redundancy design for A sensor equipment

k out of n for A sensor equipment	Reliability (%)
6 out of 7	72.24
6 out of 8	89.83
6 out of 9	96.76
6 out of 10	99.07

A 센서 장치의 9개 중 6개 이상 정상인 경우 및 그 외 장치들을 직렬로 설계 시 OO 복합무기체계의 신뢰도 모델링을 수행하면 Fig. 4와 같다.

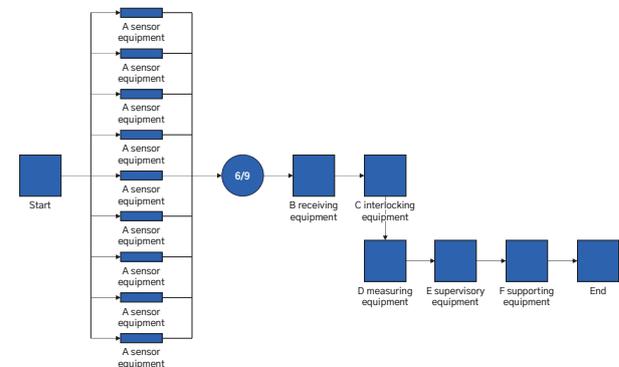


Fig. 4. Reliability block diagram for OO system of systems with 6 out of 9 redundancy design of A sensor equipment

BlockSim[®] S/W를 적용한 신뢰도 모델링을 구현하면 ○○ 복합무기체계의 신뢰도 결과값은 Fig. 5와 같이 80.63 %로 산출되었다.

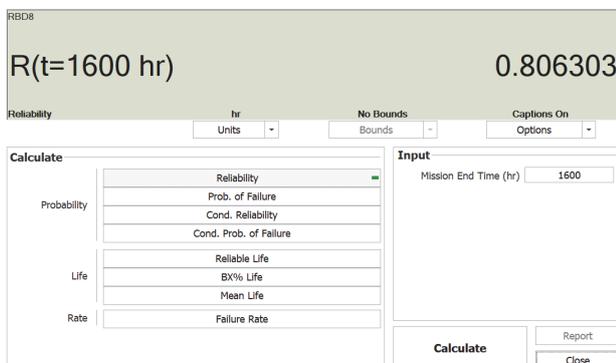


Fig. 5. Reliability value for ○○ system of systems with 6 out of 9 redundancy design of A sensor equipment

○○ 복합무기체계의 신뢰도는 A 센서 장치의 n 중 k 구조 설계($n = 9, k = 6$)를 통해 신뢰도 80 % 이상을 만족시킬 수 있었다. 단, 본 논문에서는 정상인 조건 k 를 6개로 고정하여 신뢰도 모델링을 수행한 결과 최적의 n 을 9개로 도출하였다. 하지만, n, k 변수 중 고정 변수를 어떻게 설정하느냐에 따라 다양한 신뢰도 모델링이 가능하다.

3.5.2 신뢰도 90 % 이상

○○ 복합무기체계의 신뢰도를 90 % 이상으로 설계하기 위하여 3.5.1항에서 신뢰도 80 % 이상을 만족시킨 결과와 별도로 신뢰도 모델링 수행이 가능하다. 하지만, 본 논문에서는 여러 가지 방안 중에 신뢰도 80 % 이상을 만족시킨 결과 근간으로 추가 신뢰도 모델링 대상을 선정하여 중복 설계 방법을 적용하였다.

따라서, A 센서 장치의 9개 중 6개 이상 정상인 조건을 전제로 한 후 신뢰도 모델링 적용 대상을 ○○ 복합무기체계의 하부 장치 중 신뢰도 90 % 이하인 장치를 선정하였다. 이에 따라, 신뢰도 모델링 수행에 있어서 추가 적용 대상은 E 감시 장치를 선정하였다.

E 감시 장치의 신뢰도 모델링을 구현할 때 능동 병렬, 수동 병렬 설계를 적용하였다. E 감시 장치의 능동, 수동 병렬 구조의 이중화 및 삼중화에 대한 신뢰도 분석 결과는 Table 3와 같다. 예를 들어, E 감시 장치에 대하여 수동 병렬 삼중화 설계를 수행하면, $\lambda_a = \lambda_b =$

$\lambda_c = \lambda$ 가 되며, 신뢰도를 산출하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 R(t) &= e^{-\lambda t} + \lambda t e^{-\lambda t} + 0.5(\lambda t)^2 e^{-\lambda t} \\
 &= e^{-(69/1,000,000) \times 1,600} \\
 &\quad + (69/1,000,000) \times 1,600 \\
 &\quad \times e^{-(69/1,000,000) \times 1,600} \\
 &\quad + 0.5 \times [(69/1,000,000) \times 1,600]^2 \\
 &\quad \times e^{-(69/1,000,000) \times 1,600} \\
 &= 0.9998
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

E 감시 장치의 능동 병렬 이중화, 수동 병렬 이중화, 능동 병렬 삼중화 및 수동 병렬 삼중화인 경우 신뢰도 모델링을 수행한 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Reliability of redundancy design for E supervisory equipment

Redundancy design for E supervisory equipment	Reliability (%)
Active redundancy design with one of two	98.91
Standby redundancy design with one of two	99.43
Active redundancy design with one of three	99.89
Standby redundancy design with one of three	99.98

A 센서 장치에서 9개 중 6개가 정상인 경우 및 E 감시 장치의 수동 병렬 삼중화 설계를 신뢰도 블록 다이어그램으로 도식화하면 Fig. 6와 같다.

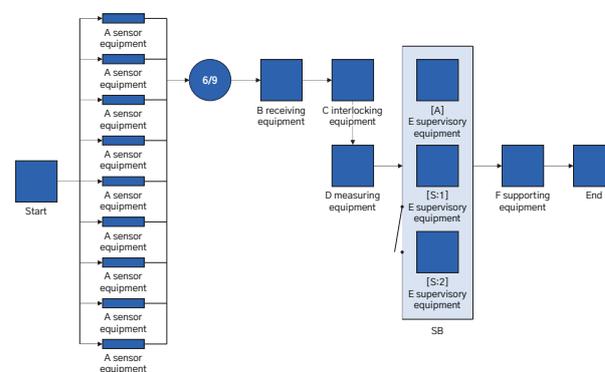


Fig. 6. Reliability block diagram for ○○ system of systems with 6 out of 9 redundancy design of A sensor equipment and standby redundancy design in three parallel elements of E supervisory equipment

이때, 시간에 따른 신뢰도는 Fig. 7과 같이 보여준다.

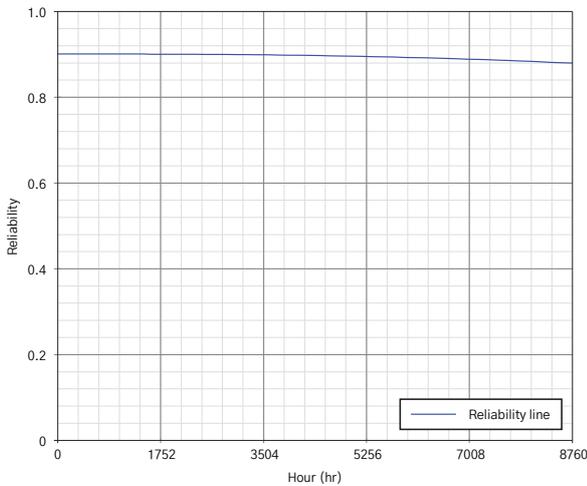


Fig. 7. Reliability vs. time for ○○ system of systems with 6 out of 9 redundancy design of A sensor equipment and standby redundancy design in three parallel elements of E supervisory equipment

연간운용시간 1,600시간을 적용하였을 때 ○○ 복합무기체계의 신뢰도는 Fig. 8과 같이 90.02%로 산출되었다.

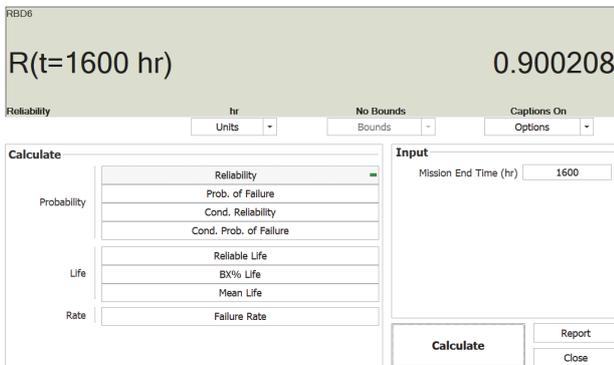


Fig. 8. Reliability value for standby redundancy design with three parallel elements

○○ 복합무기체계의 신뢰도가 90% 이상을 만족하기 위한 A 센서 장치 및 E 감시 장치의 중복 설계를 수행하였다. A 센서 장치에서 9개 중 6개가 정상인 경우에서 E 감시 장치의 능동 병렬 이중화, 수동 병렬 이중화, 능동 병렬 삼중화, 수동 병렬 삼중화 설계를 수행하였다. 또한, A 센서 장치에서 10개 중 6개가 정상인 경우에 대하여 동일한 조건으로 설계를 수행하였다. ○○ 복합무기체계의 신뢰도 모델링 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Reliability for ○○ system of systems

A sensor equipment	E supervisory equipment	Reliability for ○○ system of systems (%)
6 out of 9 redundancy design	Active redundancy design with one of two	89.06
	Standby redundancy design with one of two	89.53
	Active redundancy design with one of three	89.94
	Standby redundancy design with one of three	90.02
6 out of 10 redundancy design	Active redundancy design with one of two	91.18
	Standby redundancy design with one of two	91.67
	Active redundancy design with one of three	92.08
	Standby redundancy design with one of three	92.17

분석 결과, A 센서 장치에서 9개 중 6개가 정상인 경우 및 E 감시 장치의 수동 병렬 삼중화 설계가 최적인 조건으로 분석되었다. 하지만, Fig. 9과 같이 중복 설계 복잡도를 고려할 때는 A 센서 장치에서 10개 중 6개가 정상인 경우 및 E 감시 장치의 능동 병렬 이중화 설계를 선택할 수 있다.

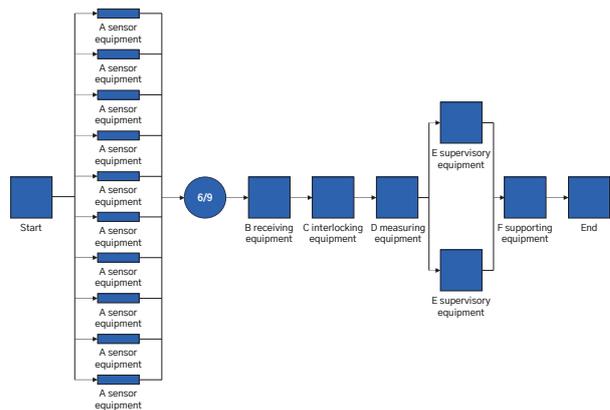


Fig. 9. Reliability block diagram for ○○ system of systems with 6 out of 10 redundancy design of A sensor equipment and active redundancy design in two parallel elements of E supervisory equipment

4. 결론

신뢰도 예측을 수행하기 전에 신뢰도 블록 다이어그램

램을 작성하여 신뢰도 목표값의 만족 여부를 확인해야 한다. 신뢰도 블록 다이어그램은 일반적으로 세부 설계 사항과 관련 없이 전체 개념을 명확하게 할 수 있다. 이후, 신뢰도 블록 다이어그램에서 특정 대상 장치에 대한 신뢰도를 전체 시스템 입장에서 파악하여 분배한다.

본 논문은 복합무기체계의 신뢰도 모델링 설계 구현 방안을 제시하였다. 분석대상은 ○○ 복합무기체제로 선정하였고, 연간운용시간 1,600시간을 적용하여 각각의 하부 장치별 신뢰도 예측값을 산출하였다. 신뢰도 블록 다이어그램은 BlockSim[®] S/W를 활용하였으며, ○○ 복합무기체계의 단일 설계 및 직렬 구조인 경우의 신뢰도는 71 %로 산출되었다. 이 결과를 기반으로 신뢰도 80 % 및 90 % 이상을 만족할 수 있는 신뢰도 모델링을 구현하였다. 신뢰도 80 % 이상을 만족하는 신뢰도 모델링 결과는 A 센서 장치의 9 중 6 구조 설계를 통해 만족시킬 수 있었다. 또한, 신뢰도 90 % 이상을 만족하는 신뢰도 모델링 결과는 A 센서 장치의 9 중 6 구조 설계 및 E 감시 장치의 수동 병렬 삼중화 설계를 통해 만족시킬 수 있었다.

본 논문의 신뢰도 모델링 구현 방안은 유사 복합무기체계 및 단일무기체계의 신뢰도 모델링 수행 시 활용

가능하다. 또한, 프로젝트 수행에 있어서 시제품 실패 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] MIL STD 756B, "Reliability Modeling & Prediction," Department of Defense, Task Section 100: Reliability Modeling, p. 1, 1981.
- [2] MIL STD 785B, "Reliability Program for System & Equipment Development & Production," Department of Defense, Task 201: Reliability Modeling, p. 1, 1980.
- [3] MIL HDBK 338B, "Electronic Reliability Design Handbook," Department of Defense, Section 6: Reliability Specification, Allocation, Modeling & Prediction, p. 24, 1998.
- [4] INCOSE "Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities," p. 14, 2015.
- [5] ROK Ministry of National Defense, "Total Life Cycle System Management," Department of Defense Instruction Number 2779, pp. 38-39, 2023.
- [6] DAPA, "RAM Task Guide for Weapon System," Department of Defense Instruction Number 726, Defense Acquisition Program Administration, pp. 9-11, 2021.
- [7] "BlockSimUser's Guide," ReliaSoft, p. 241, 2018.
- [8] "Reliability Seven Tools Guide," Korea Institute for Advancement of Technology, p. 97, 2013.