

## 시정 유효 계수에 대한 시뮬레이션을 이용한 발사대 체계 신뢰도 예측 사례 연구

이용준<sup>1\*</sup>, 박우재<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국방기술진흥연구소, <sup>2</sup>국방기술품질원

## Reliability Projection Using Simulation on Fix Effectiveness Factor: a Case Study of Launcher System

Yong-Jun Lee<sup>1\*</sup>, Woo-Jae Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement

<sup>2</sup>Defense Agency for Technology and Quality

**요 약** MIL-HDBK-189C에서는 신뢰도 성장모형 중 예측 모형으로 잠재된 고장모드와 시정 유효 계수(FEF, Fix Effectiveness Factor)의 효과를 고려한 CERPM(Crow Extended Reliability Projection Model)을 제안하고 있다. 이 연구에서는 시정 유효 계수에 대해 시뮬레이션을 이용하여 무기체계의 야전 운용 신뢰도를 예측하는 방안을 제안하였으며, 기동화력장비 중 하나인 발사대에 적용한 사례를 함께 제안하였다. 국내의 경우 시험평가 단계에서 시험 대상 시제 수가 충분하지 않아 충분한 수의 고장을 확인할 수 없으므로 FEF를 추정하기가 어려우므로 CERPM을 단순히 적용하기가 어렵다. 따라서 동일 고장모드에서 발생하는 고장의 수가 부족하여 FEF를 추정하지 못하는 경우, 무기체계에 대한 평균 FEF를 추정하고 FEF에 대한 확률 분포 정보를 이용하는 시뮬레이션 방법을 제안하였다. 적용 사례에서는 제안된 방법을 이용하여 발사대의 야전 운용 신뢰도를 예측하였으며, 그 결과를 실제 야전 운용 단계에서 실현된 MTBF 추정값과 비교 분석하였다.

**Abstract** There is CERPM considering unsurfaced failure mode and FEF as a projection model of a reliability growth model in MIL-HDBK-189C. In this study, a procedure using simulation on FEF is suggested for reliability projection of a weapon system. But it is difficult to apply CERPM for a weapon system because a sufficient failure number cannot be surfaced for estimating FEF during the testing and evaluation phase in Korea. Therefore, if the number of failures occurring in the same failure mode is insufficient to estimate the FEF, a procedure is suggested using a simulation that estimates the mean FEF of a weapon system and the probability distribution of FEF. In a case study, the reliability of a launcher system was projected using the suggested procedure, and the projected result was compared with demonstrated MTBFs from real field data.

**Keywords** : Reliability Growth, Reliability Projection, Crow Extended Reliability Projection Model

---

\*Corresponding Author : Yong-Jun Lee(KRIT)

email: yjlee@dtqa.re.kr

Received August 9, 2021

Accepted September 3, 2021

Revised August 26, 2021

Published September 30, 2021

## 1. 서론

무기체계의 개발 단계부터 양산 및 전력화에 이르기까지 무기체계 운용 신뢰도 목표값을 만족하기 위한 노력은 지속적으로 진행되며, 보통의 경우 무기체계에 대한 신뢰도 성장관리를 통해 진행된다. 무기체계의 신뢰도 성장은 일반적으로 개발 및 초도 양산 단계의 신뢰성 시험을 통해 발견되는 고장과 이에 대한 시정조치(Fix)의 지속적인 반복 활동을 통해 이루어진다. 그러나 고장모드의 발견과 신뢰도 성장 관련 조치에도 불구하고 시험 기간 모든 고장모드가 나타나는 것을 기대하기는 어렵다. 시험에서 발생하지 않고 잠재된 고장모드(특히 시정조치가 필요한 고장모드)는 무기체계의 전력화 이후 야전에서 발생할 수 있으며 이는 무기체계의 야전 운용 신뢰도를 떨어뜨리는 주요 원인 가운데 하나이다. 아울러 개발 및 양산 단계 시험에서 발생한 고장에 대한 시정조치의 효과는 항상 완벽한 것이 아니며 개별 고장모드의 초기 고장률 대비 일정 부분의 감소로 나타나게 되며, MIL-HDBK-189C[1]는 고장률의 감소 비율을 시정 유효 계수(FEF : Fix Effectiveness Factor)라 부른다. MIL-HDBK-189C의 Crow Extended Reliability Projection Model(CERPM)은 이러한 잠재된 고장모드와 시정 조치의 효과를 고려하고 있으며, 무기체계 개발 및 초도 양산 단계의 신뢰성 시험에서 발생한 고장모드에 대한 고장데이터를 기준으로 전력화 이후 야전 운용 신뢰도를 예측할 수 있는 모형이다.

체계에 대한 신뢰성 시험을 통해 신뢰도 성장 모형을 적용한 신뢰도 성장관리 관련 최근 연구는 다음과 같다. Lee et al.은 KA-1 항공기의 운영 자료를 바탕으로 Duane 모형과 Crow-AMSAA 모형을 이용하여 KA-1 항공기의 신뢰도 성장을 분석한 사례를 보였다[2]. Chung et al.는 K계열 무기체계의 야전 고장데이터를 수집하여 신뢰도 성장 모형에 적용함으로써 무기체계 및 하위 구성품에 대한 신뢰도를 추정하는 문제를 다루었다[3]. Kim et al.는 일회성 체계(One-Shot System)의 FAT(Factory Acceptance Test), 개발 시험(DT, Developmental Test)과 운용시험(OT, Operational Test) 단계에서의 고장 횟수를 바탕으로 Crow-AMSAA 이산형 모형을 적용하여 신뢰도 및 성장률 등을 추정하였다[4]. Khanh et al.은 개발 시험 계획 동안 신뢰도 성장에 대한 새로운 방법을 제안하고, 통합적인 운용 조건에서 로켓 엔진의 신뢰도 추정 방법을 제시하였다[5]. Crow는 실제 시험 데이터와 시험에서 주어진 예측 기댓

값을 기반으로 하여 미래의 모든 시험 단계에 걸쳐 계획된 신뢰도 성장 곡선을 지속적으로 갱신하는 방법을 제안하였다[6]. Lee et al.은 무기체계 신뢰성 보증 방안 프로세스 가운데 기동장비의 신뢰도 성장관리에 대한 방안을 제시하였다[7]. Lee et al.은 Crow-AMSAA 모형을 이용하여 K-000(장갑차)에 적용한 사례 연구를 수행하였다[8]. Zhang et al.은 자동차 연간 수리 횟수를 기반으로 한 신뢰도 성장 모형으로 변형된 Crow-AMSAA 모형을 제시하고, 제시한 모형이 실제 자동차 브랜드별 고장 수리 데이터를 잘 설명함을 사례 연구를 통해 보였다[9]. Crow는 통합시험, 기능 시험, 안전 시험, 환경시험과 같이 체계를 개발할 때 수행하는 다른 시험에서 발생한 고장모드에 대한 시정조치를 신뢰도 성장 시험 기반 신뢰도 성장 예측 모델에 반영하는 방법을 제시하였다[10]. 기존의 연구에서는 대부분 Crow-AMSAA 모형을 이용하여 해당 시점에서의 신뢰도를 추정하는 연구가 대부분이었다. 그러나 무기체계가 설계단계 이후 야전 운용 단계에서 실현될 신뢰도가 목표한 신뢰도를 만족하지 못하는 경우를 대비하기 위해서는 사전에 신뢰도를 예측해볼 필요가 있다.

따라서 이 연구에서는 시험 및 양산 단계에서 파악되지 않은 잠재적인 고장모드와 FEF를 동시에 고려하는 CERPM을 이용하여 무기체계 중 기동화력장비의 정확한 야전 운용 신뢰도를 예측하는 방법을 제시하고 기동화력장비 중 하나인 발사대 체계에 대한 부분적인 적용 사례를 제시하였다. 신뢰도 예측 모델인 CERPM의 경우 시험 시간( $t$ )까지 발생한 고장데이터를 기준으로 시정조치가 필요한 고장모드의 고장이 수리 효과만큼 고장률이 감소하였으며, 잠재 고장모드가  $t$  시간 이후에 나타날 것을 고려한다. 따라서 시험 데이터를 기반으로 기동화력장비의 야전 운용 신뢰도를 예측하기에 적합한 모형이다. 기동화력장비 발사대에 관한 적용 사례에서는(1) 발사대의 시험 데이터와 야전 운용 데이터의 고장모드 구분, (2) 발사대의 잠재 B모드 고장과 시정 유효 계수 추정, (3) 시뮬레이션을 이용한 야전 운용 신뢰도 예측 절차를 제시하였으며, 기존 발사대 야전 단계의 고장데이터 분석결과와 비교를 통해 CERPM 적용과 제시된 시뮬레이션 절차의 유효성을 확인하였다.

## 2. 야전 운용 신뢰도 예측 모형 (CERPM)

MIL-HDBK-189C에서는 체계 신뢰성 시험 중 발견

된 고장모드를 Table 1과 같이 구분한다.

Table 1. Failure Mode(MIL-HDBK-189C)

| Failure Mode |    | Description                     |
|--------------|----|---------------------------------|
| A            |    | Repair (No Fix)                 |
| B            | BC | Fix in Test                     |
|              | BD | Delayed Fix (Until Test Finish) |

고장모드는 A모드와 B모드로 구분되며, A모드는 시정조치를 취하지 않는 고장이며 B모드는 시정조치를 취하는 고장이다[1]. 수리하는 것이 의미 없는 Legacy System이나 상용품(COTS, Commercial Off the Shelf)에 대해 발생한 고장 또는 단순 교체가 A모드 고장에 해당한다. B모드의 경우 다시 BC모드와 BD모드로 구분되며 BC모드는 시험 중에 시정조치를 취하는 고장이고 BD모드는 시험이 종료될 때까지 시정조치가 지연되었다가 시험이 끝난 후 시정조치가 취해지는 고장을 의미한다. 신뢰도 성장은 시험 동안 발견된 고장모드에 대해 원인을 분석하고 시정조치를 수행함으로써 고장률의 감소를 통해 달성한다. A모드는 시정조치를 취하지 않으므로 고장률이 변하지 않지만, B모드는 시정조치를 수행하기 때문에 고장률이 감소하게 된다. 하지만 시정조치를 수행한다고 하더라도 해당 고장모드의 고장률이 0이 되는 것은 아니다. 따라서 시정조치 수행 이전 고장률과 시정조치 수행 이후 고장률의 감소 비율을 FEF라 한다. MIL-HDBK-189C는 FEF에 대해 전문 엔지니어가 기술력, 과거 경험 등을 통해 주관적인 판단으로 값을 정할 수 있다고 권고하며 FEF는 경험적으로 볼 때 Table 2와 같이 FEF 평균은 0.7 정도의 값을 가진다고 제시한다. 이는 시정조치 후의 고장률은 최초 고장률의 30%(1-FEF)가 된다는 것을 의미한다.

Table 2. Historical Growth Parameter Estimates (MIL-HDBK-189C)

| Parameter                     | Mean / Median | Range       |
|-------------------------------|---------------|-------------|
| Fix Effectiveness Factor(FEF) | 0.70 / 0.71   | 0.55 ~ 0.85 |

CERPM은 시험 기간 내에 시정조치를 수행하는 RGTMC(Reliability Growth Tracking Model-Continuous)와 시험이 종료된 후 시정조치를 수행하는 ACPM(AMSAA-Crow Projection Model)을 조합한 모

형이다. ACPM은 발견된 고장모드에 대해 신뢰성 시험이 끝난 후 모든 시정조치가 수행되는 경우 미래 시점에서의 신뢰도를 추정하기 위한 모형이다. ACPM은 CERPM의 특수한 경우이며 CERPM에서 BC모드 고장이 발생하지 않았을 때(시험 중 고장모드가 발견되어도 시정조치는 시험 완료 후 수행)와 같다[11, 12].

CERPM은 신뢰성 시험에서 발생한 고장모드에 대해 일부는 시험 기간 내에 시정조치가 수행되고 나머지는 시험 기간 종료 후 시정조치가 수행될 때 적용되는 모형이며, RGTMC에 연장되어 만들어진 모형이다[13]. CERPM의 목적은 시험 단계 동안 발견한 고장모드에 대하여 시험 기간 내의 시정조치와 시험 종료 후의 시정조치의 개선 사항을 추정 및 반영하여 미래 시점의 신뢰도를 예측하는 것이다.

CERPM에서 시험 기간  $t$  동안 발생하는 고장 수는  $N(t)$ 이고, 고장은 Power Law Mean Value Function을 갖는 NHPP(Non-Homogeneous Poisson Process)에 따라 독립적으로 발생한다. 그리고 시정조치로 인하여 새로운 고장모드는 발생하지 않는다고 가정한다. 또한 시험기간 동안 발생한 A모드 고장은 고장률 변화에 영향을 주지 않는다. CERPM에서 사용되는 신뢰도 지표는 DMTBF (Demonstrated Mean Time Between Failures), PMTBF (Projected Mean Time Between Failures), GPMTBF (Growth Potential Mean Time Between Failures)이며 추정 식은 아래와 같다. 단, DMTBF는 시험 중 BC모드가 있는 경우  $\lambda_{CA}$ 의 역수이고 BC모드가 없는 경우  $\lambda_D$ 의 역수이며 GPMTBF는 잠재된 BD모드 고장이 모두 제거되었을 때 가질 수 있는 최대 MTBF 이므로 PMTBF 추정 식에서  $\hat{h}(T|BD)$ 이 없는 것과 같다.

$$DMTBF = 1/\lambda_{CA} = (\lambda\beta T)LSUP\beta - 1^{-1}$$

$$(or \ DMTBF = 1/\lambda_D = (\frac{N_A + N_{BD}}{T})^{-1} \quad (1)$$

$$PMTBF = 1/\lambda_{EM} = (\lambda_{CA} (or \lambda_D) - \lambda_{BD} + \sum_{i=1}^k (1 - d_i) \lambda_i + \bar{d} h(T|BD))^{-1} \quad (2)$$

$$GPMTBF = 1/\lambda_{EM} = (\lambda_{CA} (or \lambda_D) - \lambda_{BD} + \sum_{i=1}^k (1 - d_i) \lambda_i)^{-1} \quad (3)$$

여기서  $\lambda_{CA}$ 와  $\lambda_D$ 는 DFI(Demonstrated Failure Intensity),  $\lambda_{EM}$ 는 PFI(Projected Failure Intensity)이며,  $\lambda$ 와  $\beta$ 는 RGTMC의 척도 모수와 형상 모수,  $N_A$ 는 A모드 고장 수,  $N_{BD}$ 는 BD모드 고장 수, T는 총 시험 시간이다. 그리고  $\lambda_{BD}$ 는 BD모드 고장에 대한 FI(Failure Intensity),  $d_i$ 는 BD모드의 고장모드 별 FEF,  $\lambda_i(N_i/T, N_i$ 는  $i$ 번째 BD모드 고장의 고장 수)는 BD모드의 고장모드 별 FI와  $\bar{d}$ 는 평균 FEF,  $\hat{h}(T|BD)$ 는 잠재된 BD모드 고장의 FI이다.

### 3. 야전 운용 신뢰도 예측 사례

발사대(Level 1)는 기동 타격 및 중요 시설 방호를 수행하도록 개발된 전투용 무기체계이며, BOM (Bill of Material)을 기준으로 Table 3과 같이 10개 부체계(Level 2)로 구성되어 있다. 발사대 야전 운용 신뢰도는 운용시험(OT, Operational Test)와 야전시험(FT, Field Test)의 고장데이터를 이용하여 다음과 같이 예측하였다. OT 고장데이터로 PMTBF와 GPMTBF를 구하여 FT의 신뢰도를 예측한 뒤 실제 FT 고장데이터를 기준으로 실현된 DMTBF 추정값과 비교하였다. 그리고 FT 고장데이터로 PMTBF와 GPMTBF를 구하여 야전 운용에서의 신뢰도를 예측하고 실제 야전 운용의 고장데이터를 기준으로 실현된 DMTBF 추정값과 비교하였다.

Table 3. Subsystems of Launcher System

| Classification          |                 |   |   |   |   |
|-------------------------|-----------------|---|---|---|---|
| System<br>(Level 1)     | Launcher System |   |   |   |   |
| Sub-System<br>(Level 2) | A               | B | C | D | E |
|                         | F               | G | H | I | J |

이를 위해 OT, FT와 야전 운용 단계의 고장데이터를 수집하였으며, 수집된 고장데이터의 고장모드를 A모드/BC모드/BD모드로 구분하였다. CERPM 적용에 필요한 고장모드별 FEF( $d_i$ )는 시정조치에 따른 고장률의 감소율이다. 따라서 발사대 운용 신뢰도 예측에 필요한 고장모드별 FEF( $d_i$ )는 시험 및 야전 운용에서 발생한 같은 B모드 고장에 대한 고장률 비교를 통해 추정할 수 있다. 일반적으로 수명분포와 해당 분포의 고장률 또는 고장 강

도를 추정하기 위해서는 고장모드 1개에 대해 최소 3건의 고장이 발생해야 고장률 또는 고장 강도를 추정할 수 있다. 하지만 발사대의 경우 OT와 FT의 일부 BD모드 고장이 3건 미만으로 발생하여 고장률을 추정할 수 없었다. MIL-HDBK-189C에서는 FEF에 대해 품목 또는 체제마다 다르지만 FEF는 평균이 0.7 정도이며 0.55~0.85의 범위를 가진다고 제시하고 있다. 따라서 이 연구에서는 MIL-HDBK-189C에서 제시한 시정 유효 계수의 평균과 범위에 대한 정보와 다음 3.2절에서 추정한 발사대에 대한 평균 시정 유효 계수와 관련된 정보를 이용하여 시정 유효 계수에 대한 시뮬레이션을 통해 발사대 야전 운용 신뢰도를 추정하였다.

#### 3.1 발사대의 고장데이터 수집 및 고장모드 구분

발사대 야전 운용 신뢰도를 예측하기 위해 OT, FT, 야전 단계에서의 고장데이터들을 수집하였으며, 수집된 고장데이터들의 고장모드를 A모드 고장, BD모드 고장으로 분류하였다. DT의 경우 고장이 4건 발생하였으나 고장이 발생한 시점의 누적가동시간을 확인할 수 없었으므로 분석에서 제외하였으며, OT와 FT에서는 시험 중에 시정조치가 이루어지지 않았기 때문에 BC모드 고장은 없다. 고장데이터에 대한 고장모드 구분은 실제 고장 및 시정조치 내용에 따라 Repair와 Fix로 구분하였으며 Repair는 A모드 고장, Fix는 BD모드 고장이다. OT에서 발생한 고장은 총 31개이며, 고장모드를 분류한 결과 A모드 고장은 9개, BD모드 고장은 22개였다. BD모드 고장 22개 데이터는 다른 유형의 고장모드 21개가 발생하였으며 한 유형의 고장모드만 2회 발생하였다. FT에서 발생한 고장은 총 27개이며, 동일 고장과 데이터 오기로 인한 고장 8개를 제외하여 총 19개의 고장데이터에 대해 고장모드를 분류한 결과 A모드 고장은 15개, BD모드 고장은 각각 다른 유형의 고장이 4개였다. 야전 운용에서 발생한 고장은 총 370개이며, 동일 고장, 데이터 오기, S/W 설계 변경 등으로 인한 고장 114개(A모드 고장 55개, BD모드 고장 59개)를 제외하여 총 256개 고장데이터에 대해 고장모드를 분류한 결과 A모드 고장은 135개, BD모드 고장은 121개였다. 발사대와 같은 기동화력장비의 경우 부대별로 야전 배치 시점이 다르며 야전 운용 환경에 따라 야전에서 실현되는 신뢰도가 다르게 나타날 수 있다. 따라서 야전 운용 단계에서 수집된 고장데이터는 야전 배치된 부대에 따라 A그룹(A부대)과 B그룹(B-1, B-2 부대)로 구분하였으며, 이러한 부대별 고장데이터를 기준으로 야전 운용 신뢰도를 확인하였다.

### 3.2 잠재 B모드 고장비율 및 평균 시정유효계수 추정

발사대 야전 운용 신뢰도 예측에 앞서 고장모드가 구분된 OT 고장데이터와 야전 운용의 고장데이터를 이용하여 잠재 B모드 고장비율을 추정하고자 하였다. 발사대의 잠재 B모드 고장비율은 시험에서 발생하지 않은 B모드 고장비율이므로 실제 데이터를 기준으로 야전에서 발생한 B모드 고장 중 OT에서 나타난 B모드 고장과 같은 B모드 고장은 제외한 뒤, OT의 B모드 고장 수와 야전 운용에서의 B모드 고장 수의 비율로 잠재 B모드 고장비율을 추정하였다. MIL-HDBK-189C는 경험적으로 볼 때 잠재 B모드 고장비율이 시험 동안 드러난 B모드 고장 수의 약 5배 B모드 고장이 드러나지 않는다고 하고 있으나, 발사대 체계(Level 1)의 경우 OT에서 발생한 B모드 고장은 22개였으며, 야전 운용에서 발생한 B모드 고장 수는 60개였다. 이는 야전 운용에서 OT보다 약 2.7배의 B모드 고장이 드러났으며 이는 전체 B모드 고장 중 73.17%를 차지하는 것으로 확인되었다.

FEF는 시정조치에 따른 고장률의 감소율이므로 발사대 운용 신뢰도 예측에 필요한 고장모드별 FEF( $d_i$ )는 시험 및 야전 운용에서 발생한 같은 B모드 고장에 대한 고장률 비교를 통해 추정할 수 있다. 하지만 발사대의 경우 OT에서 같은 유형의 BD모드 고장이 3개 미만으로 발생하여 지수 분포 가정의 고장률을 추정할 수 없었다. 이처럼 발사대의 경우 같은 유형의 BD모드 고장에서 발생한 고장이 충분하지 않아 고장모드별 FEF( $d_i$ ) 추정이 어려우므로 OT에서 BD모드 고장데이터를 이용하여 구한 체계 고장률과 야전 운용에서 B모드 고장데이터를 이용하여 구한 체계 고장률 비교를 통해 체계에 대한 평균 FEF( $\bar{d}$ )를 추정할 수 있다. OT에서 B모드 고장데이터를 이용하여 구한 체계 고장률과 야전 운용에서 B모드 고장데이터를 이용하여 구한 체계 고장률 구하기 위해서는 OT와 야전 운용에서의 고장 간격 간 시간을 기준으로 적합한 확률 분포와 모수를 찾아야 한다. OT와 야전 운용에서의 B모드 고장데이터를 이용하여 발사대 체계 고장 간격 시간이 지수 분포를 따른다는 가정으로 OT와 야전 운용에서의 발사대 체계 고장률과 MTBF를 구하면 Table 4와 같다.

OT와 야전 운용에서의 발사대 체계 고장률 비율(야전 운용 고장률/운용시험 고장률)은 0.1754 (0.002850/0.016243)이며, 이를 이용하여 산출한 발사대 체계의 평균 FEF( $\bar{d}$ )는 0.8246(1-0.1754)이다. 발사대와 같이 OT의 고장데이터가 충분하지 않아 고장모드별 FEF( $d_i$ )

추정이 어려운 경우 OT와 야전 운용에서의 체계 고장률 비교를 통해 체계에 대한 평균 FEF( $\bar{d}$ )를 간접적으로 추정할 수 있었으며, 이는 고장모드별 FEF( $d_i$ )의 평균과 같다고 볼 수 있다.

Table 4. Failure Rate and MTBF of Launcher System (BD-Mode Failures)

| Classification   | $\lambda$ (Failures/hr) | MTBF(hrs) |
|------------------|-------------------------|-----------|
| Operational Test | 0.016243                | 61.565    |
| Field            | 0.002850                | 350.935   |

MIL-HDBK-189C에서는 FEF에 대해 품목 또는 체계마다 다르지만 FEF는 평균 0.7이며 0.55~0.85의 범위를 가진다고 제시하였으며, 발사대 체계에 대한 평균 FEF( $\bar{d}$ ) 0.8246은 MIL-HDBK-189C에서 제시한 FEF의 범위 내에 속하므로 다음 3.3절 시물레이션을 이용한 발사대 야전 운용 신뢰도 추정에서 시물레이션에 사용한 고장모드별 FEF( $d_i$ )에 대한 확률 분포의 정보로 활용하였다.

### 3.3 시물레이션을 이용한 발사대 운용신뢰도 예측

발사대의 야전 운용 신뢰도는 CERPM을 기반으로 예측하고자 하였다. 그러나 OT의 고장데이터가 충분하지 않아 고장모드별 FEF( $d_i$ ) 추정이 어려우므로 시물레이션을 이용하여 고장모드별 FEF( $d_i$ )를 임의로 생성하고 CERPM의 신뢰도 지표인 DMTBF, PMTBF, GPMTBF를 추정하였다. 시물레이션을 이용한 발사대 운용 신뢰도 예측 절차는 Table 5와 같다.

Table 5. The procedure of operational reliability projection using simulation

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Step #1 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Generation of random data of failure mode's FEF(<math>d_i</math>) based on probability distribution</li> <li>- failure mode's FEF(<math>d_i</math>) based on probability distribution and parameters                             <ul style="list-style-type: none"> <li>① Triangular(0.55, 0.8246, 0.85)</li> <li>② Triangular(0.55, 0.70, 0.85)</li> <li>③ Uniform(0.55, 0.85)</li> </ul> </li> </ul> |
| Step #2 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulation 1,000 runs (particularly probability distribution)</li> <li>- Estimation of DMTBF, PMTBF, GPMTBF of CERPM using randomly generated FEF(<math>d_i</math>)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                         |
| Step #3 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Checking the trend of PMTBF vs. FEF(<math>d_i</math>) mean(<math>\bar{d}</math>)</li> <li>- Prediction of PMTBF's mean and range</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                            |

Step #1에서는 고장모드별 FEF( $d_i$ )에 대한 확률 분포로부터 랜덤 데이터를 생성하였다. 고장모드별 FEF( $d_i$ )에 대한 정보는 발사대 체계에 대한 평균 FEF( $\bar{d}$ ) 및 MIL-HDBK-189C에서 제시한 FEF의 평균(Mean)과 범위(Range)를 고려하여 Triangular(0.55, 0.8246, 0.85), Triangular(0.55, 0.70, 0.85), Uniform (0.55, 0.85)를 고장모드별 FEF( $d_i$ )에 대한 확률분포 및 모수로 선정하였다. Step #2에서는 시뮬레이션으로 생성된 고장모드별 FEF( $d_i$ ) 랜덤 데이터를 이용하여 CERPM의 DMTBF, PMTBF, GPMTBF를 추정하였다. 발사대 OT의 경우 BD모드 고장 수가 21개이므로 Triangular(0.55, 0.8246, 0.85)를 따르는 BD모드별 FEF( $d_i$ ) 21개(1개 Set)를 랜덤하게 생성하고 OT의 종료 시점( $T=1231.3$ hrs)에서 CERPM의 DMTBF, PMTBF, GPMTBF를 추정하였다. Fig. 1.은 첫 번째로 생성된 BD모드별 FEF( $d_i$ ) 21개(1개 Set)를 이용하여 OT에서 발사대 체계에 대한 신뢰도를 예측한 결과이며, 추정된 DMTBF는 39.72hrs, PMTBF는 48.95hrs, GPMTBF는 83.23hrs이다. 같은 방법으로 Triangular(0.55, 0.8246, 0.85)를 따르는 고장모드별 FEF 랜덤 데이터 21개(1 Set)를 1,000 Set 반복 생성하여 DMTBF, PMTBF, GPMTBF 추정을 1,000회 반복하였다. Step #3에서는 Step #2에서 랜덤하게 생성된 고장모드별 FEF( $d_i$ )의 평균( $\bar{d}$ )의 변화에 따른 PMTBF의 변화를 확인하고 PMTBF의 평균과 범위를 예측하였다.

Table 6. The estimated PMTBF and GPMTB using FEF random data - Tri.(0.55, 0.8246, 0.85)

| Classification | Runs   |        |        |     |        |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|
|                | 1      | 2      | 3      |     | 998    | 999    | 1000   |
| $\bar{d}$      | 0.7390 | 0.7896 | 0.7394 |     | 0.7712 | 0.7486 | 0.7421 |
| PMTBF (hrs)    | 48.95  | 49.81  | 49.26  | ... | 49.71  | 49.23  | 48.84  |
| GPMTBF (hrs)   | 83.23  | 90.20  | 84.14  |     | 88.21  | 84.81  | 83.16  |

\* DMTBF = 39.72hrs

발사대 OT의 고장데이터를 기준으로 1,000회 반복하여 생성한 Triangular(0.55, 0.8246, 0.85)를 따르는 고장모드별 FEF 랜덤 데이터( $d_i$ ,  $\bar{d}$ )를 이용하여 DMTBF, PMTBF, GPMTBF를 산출한 결과는 Table 6

과 같다. 그리고 고장모드별 FEF 랜덤 데이터의 평균( $\bar{d}$ )에 따른 PMTBF 추정값의 변화는 Fig. 2.와 같다. FEF 랜덤 데이터의 평균( $\bar{d}$ )에 따른 PMTBF 추정값의 평균은 49.104hrs, 범위는  $1.524(\pm 0.762)$ hrs이며 최소값은 48.287hrs, 최대값은 49.811hrs로 예측되었다.

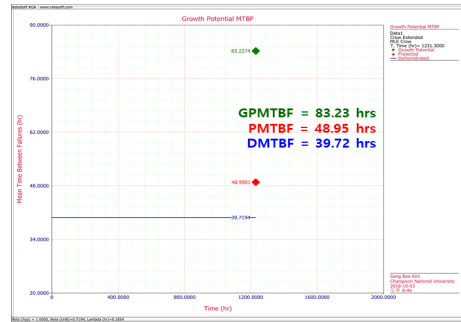


Fig. 1. The reliability projection of launcher system using FEF random data

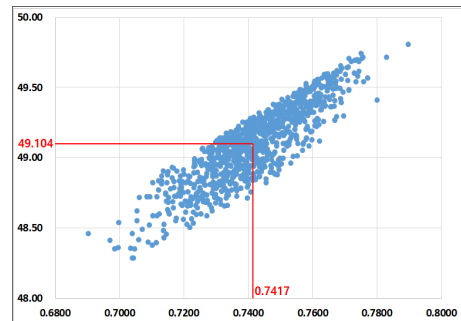


Fig. 2. PMTBF vs. FEF mean - Tri.(0.55, 0.8246, 0.85)

시뮬레이션을 이용한 발사대 운용 신뢰도 예측 절차에 따라 두 번째 시뮬레이션 조건인 확률분포 Triangular (0.55, 0.70, 0.85)를 따르는 고장모드별 FEF 랜덤 데이터의 평균( $\bar{d}$ )에 따른 PMTBF 추정값의 평균은 48.456hrs, 범위는  $1.368(\pm 0.684)$ hrs이며 최소값은 47.827hrs, 최대값은 49.196hrs로 예측되었다. 그리고 세 번째 시뮬레이션 조건인 확률분포 Uniform(0.55, 0.85)를 따르는 고장모드별 FEF 랜덤 데이터의 평균( $\bar{d}$ )에 따른 PMTBF 추정값의 평균은 48.475hrs, 범위는  $1.960(\pm 0.980)$ hrs이며 최소값은 47.435hrs, 최대값은 49.394hrs로 예측되었다. FT의 고장데이터에 대해서도 같은 시뮬레이션 방법을 이용하여 분석하였으며, OT와 FT의 고장데이터를 기준 발사대의 야전 운용 신뢰도를

예측한 결과, 야전 배치된 발사대에 대해 RGTMC를 이용하여 A그룹과 B그룹 부대별로 신뢰도, 야전에서 발사대 체계의 고장 시간이 지수 분포를 따르는 것을 가정하여 추정한 부대별 신뢰도 결과를 종합하면 Table 7과 같다.

Table 7. The result of reliability estimation for launcher system

| Phase | DMTBF | PMTBF                     |                            |                            | GPMTBF                       |                             |                            |
|-------|-------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|       |       | ①                         | ②                          | ③                          | ①                            | ②                           | ③                          |
| OT    | 39.72 | 49.1<br>(48.29~<br>49.81) | 48.46<br>(47.83~<br>49.20) | 48.48<br>(47.46~<br>49.39) | 83.92<br>(78.27~<br>90.20)   | 78.95<br>(74.94~<br>84.14)  | 79.11<br>(72.58~<br>85.57) |
| FT    | 85    | 87.1<br>(86.72~<br>87.31) | 86.98<br>(86.64~<br>87.37) | 86.97<br>(86.65~<br>87.26) | 100.75<br>(97.58~<br>102.67) | 99.78<br>(96.88~<br>103.14) | 99.7<br>(97.01~<br>102.19) |

① : Triangular(0.55, 0.8246, 0.85)

② : Triangular(0.55, 0.70, 0.85)

③ : Uniform(0.55, 0.85)

FEF에 대한 시물레이션 조건을 ① Triangular (0.55, 0.8246, 0.85), ② Triangular(0.55, 0.70, 0.85), ③ Uniform(0.55, 0.85)로 구분할 때 OT와 FT의 고장데이터를 기준으로 시물레이션을 이용하여 발사대의 야전 운용 신뢰도를 예측 및 분석한 결과는 다음과 같다. OT에서 발생한 A모드 고장(BC모드 고장은 발생하지 않음)을 기준으로 DMTBF는 39.72hrs로 추정되었으며, 발사대의 PMTBF 평균은 ① 49.10hrs, ② 48.46hrs, ③ 48.48hrs로 예측되었다. 여기서 PMTBF는 OT가 끝난 뒤 BD모드 고장에 대해 시정조치가 수행되어 시정조치 효과만큼 고장률이 감소하였으며 OT 동안 드러나지 않은 고장모드가 다음 단계에서 나타날 것을 고려한 신뢰도 지표이다. GPMTBF는 이러한 잠재 BD모드 고장이 모두 제거될 때 OT 직후 나타날 수 있는 최대 MTBF이며 GPMTBF의 평균은 ① 83.29hrs, ② 78.95hrs, ③ 79.11hrs로 예측되었다. FT의 고장데이터를 기준으로 분석한 결과는 다음과 같다. FT에서 발생한 A모드 고장(BC모드 고장은 발생하지 않음)을 기준으로 DMTBF는 85.00hrs로 추정되었으며, 발사대의 PMTBF 평균은 ① 87.10hrs, ② 86.98hrs, ③ 86.97hrs, GPMTBF의 평균은 ① 100.75hrs, ② 99.78hrs, ③ 99.70hrs로 예측되었다. 야전 운용 단계에서 RGTMC를 이용하여 부대별 야전 운용 신뢰도(MTBF)를 추정한 결과 A그룹 부대의 경우 247.72hrs, B그룹 부대의 경우 485.89hrs로 추정되었다. FT에서 예측한 결과와 부대별 야전 운용 신뢰도를 추정한 결과를 비교해 볼 때 FT에서의 PMTBF가 최대 160.75hrs, 398.92hrs 만큼 작게 예측되었다. FT에

서 예측한 야전 운용 신뢰도(PMTBF)와 실제 야전 운용 단계에서 추정된 부대별 신뢰도(MTBF)가 차이 나는 이유를 확인해본 결과 FT 이후 발사대의 구성품들에 대해 많은 수의 실제 설계 개선을 통한 설계 변경이 있었기 때문에 FT 이후 야전 운용 단계에서의 신뢰도가 크게 향상된 것으로 확인되었다.

## 4. 결론

이 연구에서는 잠재 B모드 고장과 FEF를 고려한 CERPM을 이용하여 기동화력장비의 야전 운용 신뢰도를 예측하는 방안과 기동화력장비 중 하나인 발사대에 적용한 사례를 제시하였다.

CERPM을 이용하여 야전 운용 신뢰도를 예측할 때 필요한 고장모드별 FEF의 추정은 시험 단계에서 발생한 B모드 고장에 대한 고장률과 야전 운용 단계에서 발생한 B모드 고장에 대한 고장률의 비교를 통해 추정할 수 있지만, 발사대와 같이 동일 B모드의 고장 수가 충분하지 않으면 FEF 추정에 대한 대안으로 시물레이션을 이용하는 방법을 제시하였다. FEF 추정을 위한 시물레이션의 경우 체계에 대한 평균 FEF를 먼저 추정한 뒤 MIL-HDBK-189C에서 제시한 FEF의 경험적인 값들을 고려하여 FEF에 대한 확률 분포를 가정하고 고장모드별 FEF를 랜덤하게 정하는 방법을 제시하였다. 그리고 발사대 체계 사례를 통해 이 연구에서 제시한 야전 운용 신뢰도 예측 방법을 적용하여 OT와 FT의 고장데이터를 바탕으로 야전 운용 단계의 신뢰도를 예측하고 실제 야전 운용 단계에서의 MTBF 추정값과 비교 분석하였다. 충분하지 못한 고장데이터와 고장모드 구분의 어려움, 전력화 이후의 시정조치 미반영 등으로 인하여 제시한 야전 운용 신뢰도 예측 방안의 완벽한 검증은 이루어지지 못하였으나 이 연구에서 제시한 시물레이션을 이용한 야전 운용 신뢰도 예측 방법은 충분히 현장에서 활용할 수 있는 방안임은 확인할 수 있었다. 따라서 이 연구를 통해 제시된 야전 운용 신뢰도 예측 방안은 체계 운용, 부품 소요 예측, 정비 관련 방안들의 효율성을 높여 총 수명 주기 관점의 경제성 효과에 기여할 수 있을 것이다.

## References

- [1] U. S. Department of Defense(DOD), "MIL-HDBK-189C",

- 2011.
- [2] Y. E. Lee, G. Y. Kim, G. H. Lee, Y. H. Kim, Y. M. Jung, "Reliability Growth Analysis for KA-1 Aircraft -Based on Duane and Crow-AMSAA Model", *The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, pp.871-874, 2010.
- [3] I. H. Chung, H. Y. Lee, Y. I. Park, "Reliability Evaluation of Weapon System Using Field Data: Focusing on Case Study of K-series Weapon System", *Journal of the Korean Society for Quality Management*, Vol.40, No.3, pp.278-285, Sept. 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2012.40.3.278>
- [4] M. S. Kim, J. W. Chung, J. S. Lee, "A Reliability Growth Prediction for a One-Shot System Using AMSAA Model", *Journal of Applied Reliability*, Vol. 14, No. 4, pp.225-229, Dec. 2014.
- [5] L. S. Khanh, S. Laurent, L. F. Tristan, K. Michal, "Reliability Growth Assessment Under Several Operating Stress Conditions", *2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium(RAMS). IEEE*, pp.1-6, Jan. 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/RAMS.2015.7105060>
- [6] L. H. Crow, "Reliability Growth Planning Curves based on Multi-Phase Projections", *2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium(RAMS). IEEE*, pp.1-6, Jan. 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/RAMS.2015.7105127>
- [7] C. H. Lee, D. I. Park, K. R. Kim, S. B. Kim, "A Study on Reliability Program of the Armed Vehicles", *Journal of the Korean Society for Quality Management*, Vol. 43, No. 3, pp.221-238, Sept. 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2015.43.3.221>
- [8] C. H. Lee, Y. S. Ku, H. E. Hong, I. H. Jung, D. I. Park, S. B. Kim, "A Study on Reliability Program of the Armed Vehicles", *Journal of the Korean Society for Quality Management*, Vol. 44, No. 3, pp.565-574, Sept. 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2016.44.3.565>
- [9] J. Zhang, F. B. Sun, G. Sarakakis, "Field Reliability Growth Modeling for Automotive", *2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium(RAMS). IEEE*, pp.1-7, Jan. 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/RAM.2017.7889779>
- [10] L. H. Crow, "Reliability Growth Projections Based on Data from Multiple Data Sources and Environments", *2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium(RAMS). IEEE*, pp.1-7, Jan. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/RAMS.2019.8768936>
- [11] L. H. Crow, "Reliability Growth Projection from Delayed Fixes", *Proceedings 1983 Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp.84-89, 1983.
- [12] L. H. Crow, "Methods for Assessing Reliability Growth Potential", *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1984. Proceedings. IEEE, pp. 484-489, Jan. 1984.

DOI: <https://doi.org/10.1109/RAMS.1984.764339>

- [13] L. H. Crow, "An Extended Reliability Growth Model for Managing and Assessing Corrective Actions", *Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004-RAMS. IEEE*, pp.73-80, Jan. 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/RAMS.2004.1285426>

## 이 용 준(Yong-Jun Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 부산대학교 정밀기계 (공학석사)
- 2014년 2월 : 부산대학교 첨단정밀공학 (공학박사)
- 2014년 12월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 선임연구원

<관심분야>

미래첨단기술, 국방신뢰성

## 박 우 재(Woo-Jae Park)

[정회원]



- 2016년 2월 : 창원대학교 대학원 산업시스템공학과 (공학석사)
- 2020년 8월 : 창원대학교 대학원 산업시스템공학과 (공학박사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

신뢰성공학