신뢰성응용연구
제16권, 제4호. pp.305-312, 2016

# NHPP 기반의 신뢰성 성장 예측 모델에 대한 민감도 분석*

조강훈[1] · 이홍철[2] · 장중순[1] · 박상철[1†]

[1]아주대학교 산업공학과, [2]한국건설기술연구원

# Sensitivity Analysis for Reliability Growth Projection Model based on NHPP*

K. H. Cho[1] · H. C. Lee[2] · J. S. Jang[1] · S. C. Park[1†]

[1]Department of Industrial Engineering, Ajou University
[2]Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**Purpose**: The purpose of this study is to provide a sensitivity analysis of system reliability for recognizing effectiveness of changing of BD mode failures using reliability growth projection model based on NHPP.
**Methods**: Crow extended reliability projection model (CERPM) is used to analyze the changing of two factors 1) the number of BD mode failures, 2) fix effectiveness factor (FEF) values.
**Results**: The system reliability has increased in accordance with the number of BD mode failures and FEF values have increased.
**Conclusion**: It is necessary to design failure modes and FEF values to supervise the reliability

***Keywords***: Reliability Growth Management, NHPP, Reliability Growth Projection Model, Failure Mode, Fix Effectiveness Factor, Sensitivity Analysis

## 1. 서 론

신뢰성 성장관리는 시스템 디자인이나 유지보수 정책, 관련된 제조 프로세스의 재설계와 자원의 재할당을 통해 체계의 고장을 개선하고 목표한 신뢰성을 달성하기 위해 계획한 신뢰도와 평가된 신뢰도 사이의 비교를 통해 신뢰성을 향상시키는 지속적인 관리 활동을 의미한다. 즉, 개발단계에서 목표한 신뢰성을 효과적으로 달성하기 위해 체계적인 신뢰성 시험을 통해 잠재 고장모드와 원인을 발견하고, 시험 중 발견된 고장을 분석하여 개선방안을 찾아 실행함으로서 신뢰성이 향상되는 과정을 추적 및 예측하는 활동이다[1]. 이러한 신뢰성 성장관리를 달성하는데 필요한 단계는 크게 1) 신뢰성 성장 계획, 2) 신뢰성 성장 평가의 2가지로 구분할 수 있다. 신뢰성 성장 계획에서 계획 성장곡선(Planned Growth Curve)은 각 시험기간(Test Phase)마다 초기 신뢰도(Initial MTBF)로부터 목표 신뢰도(Goal MTBF)를 달성하기 위한 신뢰성 성장

* 본 연구는 방위사업청(UD150042AD)과 한국연구재단(NRF-2015R1A2A2A01005871)의 지원으로 수행되었습니다.
† 교신저자 scpark@ajou.ac.kr
2016년 8월 16일 접수; 2016년 11월 9일 수정본 접수; 2016년 11월 12일 게재 확정.

의 가이드 라인과 같은 역할을 한다. 전형적으로 신뢰성 시험으로부터 데이터를 획득하기 전에 프로젝트 관리자와 요구자가 협력하여 개발 초기단계에 계획 성장곡선을 결정한다[2]. 우선 계획 성장곡선을 결정하고 나면 다음으로 이상적 성장곡선(Idealized Growth Curve)을 결정하게 된다. 이상적 성장곡선은 시험기간마다 결정한 계획 성장곡선과 계획한 경영 전략(Planned Management Strategy), 신뢰성 성장 계획 모델에 의해 하나의 곡선으로 표현된다. 최종적으로 신뢰성 시험을 수행하기 위한 시험계획과 발생한 고장에 대한 분류를 위한 고장모드를 정의하는 것이 필수적이다. 시험계획과 고장모드, 시정유효계수(FEF; Fix Effectiveness Factor)는 신뢰성 평가 단계에서 추적 모델과 예측 모델에 적용될 핵심 요인들이기 때문에 대상이 되는 시스템에 대한 성장을 위해 보유하고 있는 자원과 기술수준 등을 고려하여 결정하여야 한다. 시험계획은 1) 시험-시정-시험(Test-Fix-Test), 2) 시험-발견-시험(Test-Find-Test), 3) 시험-시정-발견-시험(Test-Fix-Find-Test)가 있으며, 시험-시정-시험은 신뢰성 시험을 수행하면서 동시에 발견한 고장에 대해 시정조치를 수행하는 것을 의미한다. 시험-발견-시험은 고장을 발견한 즉시 시정하는 것이 아니라 시험기간이 끝난 시점에 발견된 모든 고장을 동시에 시정하는 것을 의미하고 마지막으로 시험-시정-발견-시험은 두 가지가 통합된 시험계획을 의미한다. 고장모드는 시험계획과 밀접하게 관련된 요소이다. 고장모드는 A모드 고장과 B모드 고장으로 분류되며 A모드 고장은 시정조치를 수행하지 않는 고장을 의미하고 B모드 고장은 시정조치를 수행하는 고장을 의미한다. B모드 고장은 다시 BC모드 고장과 BD모드 고장으로 분류될 수 있다. BC모드 고장은 시험 도중에 발견한 즉시 시정조치를 수행하는 것을 의미하기 때문에 시험-시정-시험 시험계획과 연관되어있다. BD모드 고장은 시험기간이 끝난 시점에 발견된 모든 고장을 동시에 시정하는 시험-발견-시험 시험계획과 연관된다. 마지막으로 시정유효계수는 BD모드 고장에 대해 현재 고장률 대비 시정조치를 수행하였을 때 감소되어질 비율을 의미한다. 쉽게 말하면 만약 시정유효계수가 0.7이라하면 BD모드 고장에 대해 시정조치를 수행한 뒤에 남아있는 고장률은 최초 고장률의 30%(1-FEF)가 되는 것을 의미한다[2]. 이러한 세 가지 핵심 요인들이 신뢰성 성장 계획 단계에서 결정되고 나면 계획에 따라 시험을 수행하고 획득한 고장시간 데이터를 이용하여 신뢰성을 평가한다. 추적 및 예측한 신뢰도는 이상적 성장곡선과 비교하여 현재 또는 미래의 신뢰성 달성 정도를 평가한다.

대표적인 신뢰성 성장관리 모델에 대한 연구로는 Duane모형으로서 개발과정의 제품고장이 포아송과정(HPP; Homogeneous Poisson Process)으로 발생하는 것을 가정하고 제품의 고장률이 시험시간이 증가함에 따라 지수분포를 따르는 신뢰성 성장 모델을 제안하였다[7]. Crow는 Duane(1964)의 신뢰성 성장 모델의 확장 형태로서 제품고장이 포아송과정이 아닌 비동질포아송과정(NHPP; Non-Homogeneous Poisson Process)으로 발생하는 것을 가정한 AMSAA모델을 제안하였다[4]. 두 가지의 대표적인 모델을 기반으로 하여 신뢰성 성장관리에 대한 많은 연구들이 진행되어왔다. 최성훈 외 4명은 Duane모델을 기반으로 한국형고속열차 차량시스템에 대한 신뢰성 성장 평가를 통해 신뢰성 향상을 위한 개선활동의 효과를 반영할 수 있는 방법을 제안하였다[8]. 정원은 Duane모델과 Crow-AMSAA 모델을 이용하여 자동차에 대한 가속수명 시험과 신뢰성 성장관리를 적용한 사례를 분석하였다[9]. 김두현 외 1명은 국방 무기체계 중에 One-shot 체계인 유도무기를 대상으로 RGA(Reliability Growth & Repairable System Data Analysis)프로그램을 이용하여 사례 분석을 수행하였다[10]. 이호영 외 3명은 Crow-AMSAA의 추적모델을 이용하여 한국형 경량전철 시스템(K-AGT)에 대해 신뢰성 성장 평가를 수행하고 사례를 분석하였다[11]. 김준홍은 Crow-AMSAA의 예측모델을 이용하여 신뢰성 성장관리 측면에서의 목표 신뢰도와 LCC(Life Cycle Cost)분석 간의 관계를 조사하였다[12]. 소영국 외 2명은 건설장비를 대상으로 신뢰성 성장관리 적용에 대한 사례를 제시하였다[13]. 김명수 외 2명은 MIL-HDBK-189C에서 소개된 신뢰성 성장 평가 모델들에 대한 특징을 비교하고 조사하였다[14]. 정원 외 1명은 Crow-AMSAA의 예측모델을 이용하여 고장모드의 구분문제와 시정유효계수(FEF; Fix Effectiveness Factor)의 적용문제의 개선을 통한 실용적인 활용방법을 제시하였다[15].

기존의 연구들은 주로 대상 시스템에 대한 신뢰성 데이터가 충분하여 사례 분석을 통해 신뢰성 성장관리에 적용하는 방법에 대해 기술하는 것이 대부분이다. 또한 사전에 신뢰성 성장계획 단계에서 결정한 핵심

요인들이 미래의 성장관리 프로그램에 미치는 영향을 고려하지 않는다. 신뢰성 성장 계획에서 시험계획 및 모델의 선정, 적용할 시정유효계수와 같은 핵심 요인들이 정의되고 이 요인들에 따라 미래에 성장의 방향이 달라질 수 있기 때문에 계획 단계에서 적절하게 정의하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 신뢰성 성장 예측 모델을 분석하고 고려해야 하는 핵심 요인들의 변화가 신뢰도 예측에 미치는 영향에 대해 분석하는 것을 목적으로 한다. 본 논문의 구성은 제2장에서 신뢰성 성장 예측 모델에 대해 설명 및 분석하고, 제3장에서는 실험방법 및 결과에 대해 설명하며, 마지막으로 결론을 설명한다.

***Notation***

$T$ : 전체 테스트 시간

$i$ : BD모드 고장의 Index

$\hat{\beta}$ : 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation)에 의해 추정된 형상모수

$N_i$ : $i$번째 BD모드 고장의 누적 고장발생 횟수

$N_{BD}$ : T시간 동안 발생한 전체 BD모드 고장의 누적 고장발생 횟수

$m_{BD}(=K)$ : T시간 동안 발생한 BD모드 고장종류의 총 개수

$d_i$ : $i$번째 BD모드 고장의 시정유효계수(FEF, Fix Effectiveness Factor)

$\mu_d$ : 전체 BD모드 고장의 시정유효계수 평균 값($d_i$의 평균)

$h(T|BD)$ : 미래에 새로운 BD모드의 고장 발생확률($\frac{(m_{BD})^{\hat{\beta}}}{T}$)

$\lambda_i$ : $i$번째 BD모드 고장의 고장발생확률($\frac{N_i}{T}$)

$\lambda_{CA}$ : BC모드 고장에 의한 고장률

$\lambda_{BD}$ : T시간 동안 발생한 BD모드 고장 발생확률($\frac{N_{BD}}{T}$)

$\lambda_{EM}$ : 예측한 시스템의 고장률(Projection failure rate)

CERPM은 다음 식 (1)과 같다.

$$\lambda_{EM}=\lambda_{CA}-\lambda_{BD}+\sum_{i=1}^{K}(1-d_i)\lambda_i+\mu_d h(T|BD) \quad (1)$$

## 2. 신뢰성 성장 예측 모델

신뢰성 성장 평가는 시험을 통해 획득한 고장시간 데이터를 기반으로 계획 단계에서 계획한 목표 신뢰도를 달성할 수 있는지를 확인하는 것을 목적으로 한다. 신뢰성 성장 평가를 위한 모델은 크게 1) 추적 모델(Tracking Model), 2) 예측 모델(Projection Model)이 있다. 대표적인 추적 모델은 Reliability Growth Tracking Model-Continuous(RGTMC)가 있고 대표적인 예측 모델은 AMSAA-Crow Projection Model(ACPM)이다. 두 모델의 공통점은 고장의 발생이 NHPP를 따르는 것을 가정하지만 RGTMC는 시험-시정-시험(Test-Fix-Test)의 시험계획에서 사용할 수 있고 ACPM은 시험-발견-시험(Test-Find-Test)의 시험계획에서 사용할 수 있다는 것이 차이점이다. 본 논문에서는 현실적인 시험계획을 반영한 예측 모델인 Crow Extended Reliability Projection Model을 평가 모델로써 사용한다.

### 2.1 시험계획과 고장모드

시험-시정-시험은 B모드 고장 중에서 BC모드 고장에 해당하는 계획이며 시험-발견-시험은 BD모드 고장에 해당하는 계획이다. 모든 고장에 대해 바로 시정조치를 취하는 BC모드 고장으로 간주하는 것이 이상적이지만 비용적인 측면 또는 제한적인 자원의 사용에 의해 현실적으로는 수많은 제약이 존재한다. 반대로 모든 고장에 대해 시험기간 마지막에 일괄적으로 시정조치를 수행하는 BD모드 고장으로 간주하는 것은 불안정한 상태로 시험을 수행하는 것이기 때문에 바람직하지 않다. 따라서 발생하는 고장에 대해 BC모드와 BD모드로 구분하여 두 가지 모드를 동시에 고려하는 시험-시정-발견-시험(Test-Fix-Find-Test)의 시험계획이 현실적이다[2].

### 2.2 Crow Extended Reliability Projection Model (CERPM)

시험-시정-발견-시험 시험계획을 반영한 신뢰성 성장 예측 모델인 Crow Extended Reliability Projection Model(CERPM)은 기본적으로 4가지 사항들을 가정한다.

1) 고장모드는 A모드와 B모드 중 하나로 분류된다.
2) 많은 수의 잠재적인 B모드 고장이 존재한다.
3) A모드와 B모드 고장은 서로 독립적으로 발생하며 각 고장은 체계(System)의 고장을 초래한다.
4) BD모드 고장은 시험기간(Test Phase)의 마지막에 지연 시정조치(Delayed Fixes)가 수행된다.

CERPM은 RGTMC와 ACPM의 시험계획에 적용되는 고장모드인 A모드 고장과 BC모드 고장, BD모드 고장을 모두 고려할 수 있는 확장적인 모델이다[2]. 따라서 BD모드 고장과 BD모드 고장을 동시에 고려할 수 있기 때문에 앞선 2가지의 모델에 비해 현실적인 제약을 반영한 모델이라고 할 수 있다. 모델을 설명하기 위한 용어에 대한 내용은 Notation과 같다.

식 (1)에서 볼 수 있듯이 $\lambda_{CA}$는 BC모드 고장에 의한 고장률을 의미하기 때문에 결과적으로 시험-시정시험계획을 적용한 모델인 RGTMC로 예측한 고장률과 동일하다. RGTMC는 NHPP를 가정한 모델이기 때문에 $\lambda_{CA}$는 $\alpha\beta t^{\beta-1}$ 식에서 척도모수 $\alpha$와 형상모수 $\beta$를 최우추정량(MLE; Maximum Likelihood Estimation)으로 추정하고 이를 $\alpha\beta t^{\beta-1}$에 대입하여 고장률을 계산한다. 척도모수 $\alpha$는 $N/T^{\hat{\beta}}$로부터 형상모수 $\beta$는 $N/\sum_{i=1}^{N}\ln\frac{T}{x_i}$로부터 최우추정량을 계산한다. 이때 $N$은 총 고장발생횟수를 의미하고 $x_i$는 $i$번째 고장이 발생한 시간을 의미한다. 따라서 고장률을 $\lambda_{CA}$으로 표현하는 RGTMC는 고장모드의 구분없이 발생한 모든 고장시간 데이터를 이용하여 신뢰도를 예측한다. 식 (1)에서는 $\lambda_{CA}$를 제외한 값들은 BD모드 고장에 대한 파라미터를 표현하는 것이기 때문에 BD모드 고장이 발생하지 않을 경우에는 CERPM으로 예측한 신뢰도와 RGTMC로 예측한 신뢰도는 동일한 값을 나타낸다. 즉, BD모드 고장 발생이 CERPM에서 가장 중요한 요소로써 작용한다. BD모드 고장이 발생한 종류의 수와 BD모드 고장에 적용한 시정유효계수 값, 각 BD모드 고장마다 고장 발생횟수가 신뢰도 예측 결과에 가장 큰 영향을 미친다. 식 (1)에서 $\sum_{i=1}^{K}(1-d_i)\lambda_i$는 발생한 BD모드 고장에 대해 시정조치가 수행된 이후에 해당 BD모드의 고장률이 시정유효계수 값만큼 감소될 것을 반영하였다. 또한, CERPM은 미래에 발생할 가능성이 있는 잠재적인 BD모드 고장의 발생확률을 $\mu_d h(T|BD)$로 표현하였다.

### 2.3 신뢰도 예측

신뢰성 성장 예측 모델인 Crow Extended Reliability Projection Model(CERPM)은 신뢰성 성장 추적 모델인 Reliability Growth Tracking Model - Continuous (RGTMC)과는 다른 형태의 고장시간 데이터를 요구한다. RGTMC는 단순하게 고장이 발생한 시간을 누적시간의 형태로 수집하면 된다. 반면에 CERPM은 고장이 발생한 시간 데이터뿐만 아니라 발생한 고장의 고장모드가 BC모드인지 BD모드인지 구별하는 것이 필요하다. 또한 각 BD모드마다 고장이 발생한 횟수와 첫 번째 발생한 시간, 적용할 시정유효계수 값이 명시되어 있어야 한다. CERPM의 신뢰도 예측을 위한 고장시간 데이터 획득 형태는 <Table 1>과 <Table 2>와 같다.

<Table 1>과 <Table 2>는 Crow(2004)에 제시되어 있는 Projection을 위한 고장시간 데이터를 참조하였다[3]. <Table 1>에서 총 고장발생횟수는 56번이며 고장이 발생한 시간을 누적시간 형태로 집계하였다. 이러한 고장시간 데이터는 신뢰도 성장 추적 모델인 RGTMC가 필요로 하는 데이터의 획득 형태이다. 하지만 신뢰성 성장 예측을 위해서 각 고장들에 대해 추가적으로 고장모드를 결정하고 발생한 고장을 A모드와 BC모드, BD모드로 분류하였다. <Table 2>에서는 획득한 전체 고장시간 데이터 중에서 오직 BD모드 고장에 해당하는 데이터만 다른 형태로 집계하였다. BD모드의 총 고장발생횟수는 32번이며 발견된 BD모드 종류의 수는 16개이다. 또한 각 BD모드 고장마다 지연 시정조치(Delayed Fixes)를 위해 적용할 시정유효계수 값을 결정하였다. 본 논문에서 시정유효계수 값은 모든 BD모드 고장에 대해 0.7로 가정하였다.

위와 같이 고장시간 데이터를 획득하고 나면 CERPM을 이용하여 시스템의 고장률을 예측할 수 있다. 우선 신뢰성 성장 관리는 0시간부터 시작하여 T = 400시간까지 수행된다고 가정하고 CERPM으로 예측한 시스템의 고장률은 다음과 같다.

$T = 400$, $\lambda_{CA} = 0.1298$, $\lambda_{BD} = 0.0800$, $\sum_{i=1}^{K}(1-d_i)\lambda_i = 0.0240$, $\mu_d = 0.7$, $h(T|BD) = 0.0319$이므로

Table 1 Example data for crow extended reliability projection model

| Failure Number# | Cum. Failure Time (Hours) | Failure Mode | Failure Number# | Cum. Failure Time (Hours) | Failure Mode |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.7 | BC1 | 29 | 192.7 | BD11 |
| 2 | 3.7 | BC1 | 30 | 213.0 | A |
| 3 | 13.2 | BC1 | 31 | 244.8 | A |
| 4 | 15.0 | BD1 | 32 | 249.0 | BD12 |
| 5 | 17.6 | BC2 | 33 | 250.8 | A |
| 6 | 25.3 | BD2 | 34 | 260.1 | BD1 |
| 7 | 47.5 | BD3 | 35 | 263.5 | BD8 |
| 8 | 54.0 | BD4 | 36 | 273.1 | A |
| 9 | 54.5 | BC3 | 37 | 274.7 | BD6 |
| 10 | 56.4 | BD5 | 38 | 282.8 | BC11 |
| 11 | 63.6 | A | 39 | 285.0 | BD13 |
| 12 | 72.2 | BD5 | 40 | 304.0 | BD9 |
| 13 | 99.2 | BC4 | 41 | 315.4 | BD4 |
| 14 | 99.6 | BD6 | 42 | 317.1 | A |
| 15 | 100.3 | BD7 | 43 | 320.6 | A |
| 16 | 102.5 | A | 44 | 324.5 | BD12 |
| 17 | 112.0 | BD8 | 45 | 324.9 | BD10 |
| 18 | 112.2 | BC5 | 46 | 342.0 | BD5 |
| 19 | 120.9 | BD2 | 47 | 350.2 | BD3 |
| 20 | 121.9 | BC6 | 48 | 355.2 | BC12 |
| 21 | 125.5 | BD9 | 49 | 364.6 | BD10 |
| 22 | 133.4 | BD10 | 50 | 364.9 | A |
| 23 | 151.0 | BC7 | 51 | 366.3 | BD2 |
| 24 | 163.0 | BC8 | 52 | 373.0 | BD8 |
| 25 | 164.7 | BD9 | 53 | 379.4 | BD14 |
| 26 | 174.5 | BC9 | 54 | 389.0 | BD15 |
| 27 | 177.4 | BD10 | 55 | 394.9 | A |
| 28 | 191.6 | BC10 | 56 | 395.2 | BD16 |

따라서 $\lambda_{EM} = 0.1298 - 0.0800 + 0.0240 + (0.7 \times 0.0319) = 0.0961$

RGTMC의 고장률은 $\lambda_{CA}$와 동일하고 MTBF는 $M_{CA} = \left(\frac{1}{\lambda_{CA}}\right)$이기 때문에 예측한 MTBF 값은 7.704 (1/0.1298)이다. 반면에 CERPM으로 예측한 MTBF는 10.406 (1/0.0961)이다. RGTMC에 비해 CERPM으로 예측한 MTBF 값이 높게 나오는 이유는 적용한 시정유효계수 만큼의 지연 시정조치(Delayed Fixes)를 수행하였을 때 발견한 BD모드 고장률과 미래에 발생할 가능성이 있는 잠재적인 BD모드의 고장률이 감소될 것을 반영하였기 때문이다. 즉, 현재 발생한 BD모드 고장의 수와 이러한 고장들을 얼마의 효과만큼 시정할지가 예측할 MTBF 값에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 몇 가지 가정 사항들을 통해 두 가지 핵심 요인인 BD모드 고장의 발생횟수와 시정유효계수 값의 변화에 따라 CERPM으로 예측한 MTBF 변화에 대해 민감도 분석을 이용하여 분석하고자 한다.

Table 2 BD failure mode data and FEFs

| BD mode j | Nj | First Occurrence | Assessed d*j |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 15.0 | 0.70 |
| 2 | 3 | 25.3 | 0.70 |
| 3 | 2 | 47.5 | 0.70 |
| 4 | 2 | 54.0 | 0.70 |
| 5 | 3 | 56.4 | 0.70 |
| 6 | 2 | 99.6 | 0.70 |
| 7 | 1 | 100.3 | 0.70 |
| 8 | 3 | 112.0 | 0.70 |
| 9 | 3 | 125.5 | 0.70 |
| 10 | 4 | 133.4 | 0.70 |
| 11 | 1 | 192.7 | 0.70 |
| 12 | 2 | 249.2 | 0.70 |
| 13 | 1 | 285.0 | 0.70 |
| 14 | 1 | 379.4 | 0.70 |
| 15 | 1 | 389.0 | 0.70 |
| 16 | 1 | 395.2 | 0.70 |
| Total | 32 | | 11.20 |

## 3. 민감도 분석 수행 및 결과

Crow Extended Reliability Projection Model(CERPM)은 주로 BD모드 고장의 영향을 신뢰도 예측을 위한 핵심 요인으로서 반영하고 있다. 첫 번째로 식 (1)에서 보는 것과 같이 $\lambda_{BD}$는 T시간 동안 발생한 BD모드 고장의 발생확률을 의미하고 T시간 동안 발생한 전체 BD모드 고장의 누적 고장발생 횟수인 $N_{BD}$에 따라 값이 변한다. 즉 시험기간동안 발견한 BD모드 고장의 개수가 $\lambda_{BD}$의 영향을 미치고 더 나아가 CERPM이 예측하는 MTBF 값에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 두 번째로 $\sum_{i=1}^{K}(1-d_i)\lambda_i$는 현재 시험기간에서 발견한 고장에 대해 시정조치의 결과를 반영한 파라미터이다. $i$번째 BD모드 고장의 고장발생 횟수와 $i$번째 BD모드 고장에 적용할 시정유효계수 값에 따라 MTBF 결과에 영향을 미친다. 만약 적용할 시정유효계수 값이 동일한 BD모드 고장들은 고장발생 횟수가 증가하더라도 동일한 결과를 나타낸다. 예를 들어, 1번째 BD모드 고장($BD_1$)의 시정유효계수 값이 0.7이고 5번째 BD모드 고장($BD_5$)의 시정유효계수 값이 0.7로 동일하다고 가정하자. 만약 $BD_1$의 고장횟수가 3회이고 $BD_5$의 고장횟수가 4회라고 하면 $BD_1$의 고장횟수가 1회만큼 증가하였을 때 $BD_5$의 고장횟수도 1회만큼 증가하여 $BD_1$는 4회의 고장횟수이고 $BD_5$는 5회의 고장횟수라고 할지라도 시정유효계수 값이 0.7로 동일하기 때문에 MTBF 값의 결과 또한 동일하다. 따라서 본 논문에서는 몇 가지의 사항들을 가정하여 민감도 분석을 수행하고자 한다. 1) BD모드 고장의 First Occurrence Time은 변하지 않는다. 2) 사전에 계획단계에서 A모드와 BC모드를 원하는 BD모드로 정의하고 시험하였더라도 고장이 발생한 시간은 변하지 않는다. 3) First Occurrence Time이 변하지 않기 때문에 각 BD모드 고장마다 추가로 발생할 수 있는 고장의 개수는 한정적이다.

첫 번째로 BD모드 고장의 수를 변화시킨다. 가정사항 3번에 의해 BD모드 고장을 증가시키는 것이 한정적이기 때문에 가장 많은 변화를 분석해볼 수 있는 1번째 BD모드 고장($BD_1$)에 대해 총 고장발생 횟수를 1회씩 증가시키면서 CERPM으로 MTBF를 예측한 결과는 다음과 같다.

CERPM의 모든 파라미터들의 값은 고정시킨 후 $BD_1$의 고장발생 횟수를 초기 2회에서 23회까지 증가시키면서 예측한 MTBF의 값은 <Fig. 1>과 같다. 모든 고장의 발생은 실제로 Test를 수행한 후 획득한 고장시간 데이터라고 가정하여 실험하였다. <Fig. 1>에서 볼 수 있듯이 하나의 BD모드 고장이 현재 시험기간에서 발견된 횟수가 많을수록 MTBF값이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 모든 BD모드 고장에 대해서는 Delayed Fixes를 적용하기 때문에 고장이 자주 발생하는 BD모드를 시정한 효과를 반영한 결과라고 할 수 있다. 즉 자주 발생하는 고장을 시정한 이후에는 시스템의 고장률이 감소한다는 것을 의미한다. 두 번째로 BD모드에 적용할 시정유효계수 값을 변화시킨다. 식 (1)에서 $\sum_{i=1}^{K}(1-d_i)\lambda_i$을 보면 알 수 있듯이, 고장발생 횟수가 동일한 BD모드는 시정유효계수 값에 따라 다른 결과를 나타낸다. 따라서 고장발생 횟수가 1회, 2회, 3회, 4회인 BD모드 고장들에 대해 시정유효계수 값을 변화시켰다. 각 고장발생 횟수에 해당하는 고장들 중에 첫 번째 BD모드 고장을 대상으로 시정유효계수 값을 0.41부터 0.99까지 변화시키면서 예측한 MTBF의 값은 다음 <Fig. 2>와 같다.

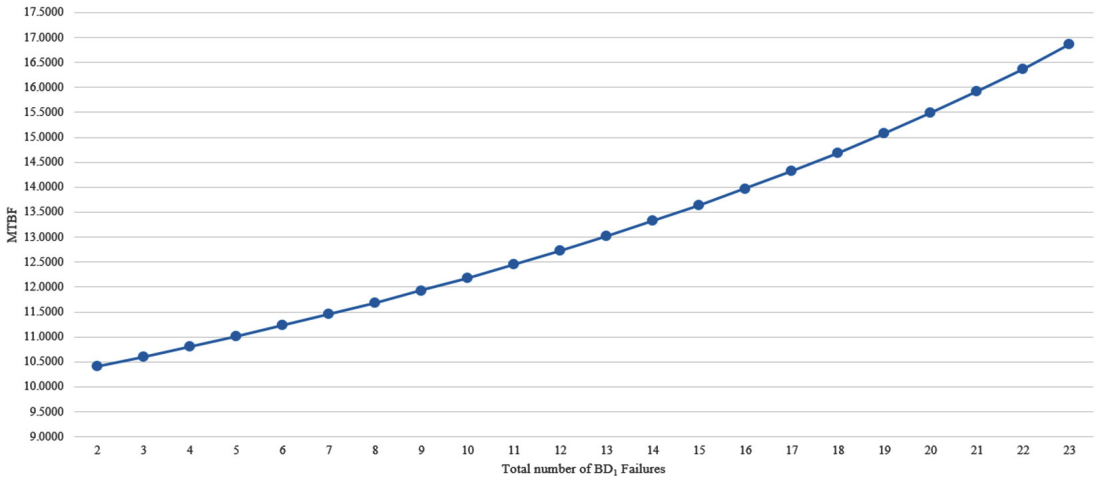


Fig. 1 A result of sensitivity analysis for changing the number of $BD_1$ failures

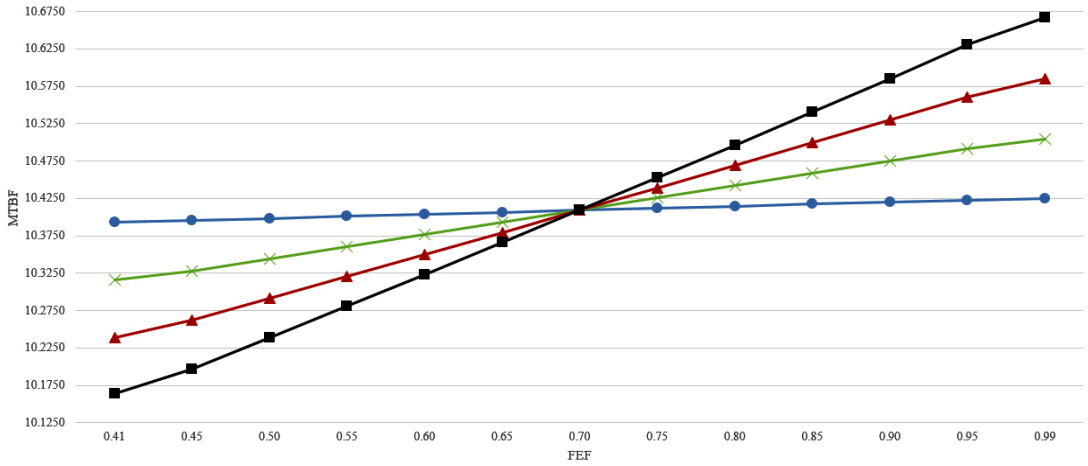


Fig. 2 A result of sensitivity analysis for changing FEF value of BD modes

<Table 2>를 보면 알 수 있듯이 1회 고장에 해당하는 첫 번째 BD모드는 $BD_7$이고 2회 고장은 $BD_1$, 3회 고장은 $BD_2$, 4회 고장은 $BD_{10}$이다. 4개의 BD모드에 대해 시정유효계수 값을 0.41부터 0.99까지 변화시켰다. <Fig. 2>에서 알 수 있듯이 고장발생 횟수가 많은 BD모드일수록 시정유효계수 값의 증가에 따른 MTBF 예측결과의 폭이 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 현재 시험기간에서 발견한 고장이 자주 발생되는 BD모드 고장일수록 시정조치 이후에 시스템의 고장률이 감소된다는 것을 의미하기 때문이다. 또한 자주 발생되는 BD모드가 시정유효계수 값이 클수록 시정조치 이후에 발생하는 고장률이 크게 감소되기 때문에 시스템의 고장률이 그만큼 감소하고 더 나아가 MTBF가 증가하게 된다.

## 4. 결 론

신뢰성 성장관리는 체계의 발견한 고장을 개선하고 목표한 신뢰성을 달성하기 위해 계획한 MTBF와 평가한 MTBF 사이의 비교를 통해 신뢰성을 향상시키는 지속적인 관리 활동을 의미한다. 신뢰도를 평가하는 방법으로는 신뢰성 성장 추적 모델과 신뢰성 성장 예측 모델이 존재하는데 이 중에 신뢰성 성장 예측 모델인 Crow Extended Reliability Projection Model (CERPM)이 현실적인 제약과 시험계획을 반영한 모

델이다. 대상 모델은 BC모드 고장뿐만 아니라 현재 발견한 BD모드 고장의 시정조치 이후 감소될 고장률과 미래에 발생할 새로운 BD모드 고장발생확률 또한 고려한다. CERPM은 BD모드 고장의 발생횟수와 BD모드에 적용할 시정유효계수 값의 변화에 따라 예측하는 신뢰도의 값이 큰 영향을 받기 때문에 몇 가지의 가정 사항들을 기반으로 두 가지 핵심 요인에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 첫 번째로 BD모드 고장이 발생하는 횟수가 증가할수록 MTBF가 증가하였으며 두 번째로 시정유효계수 값이 증가함에 따라MTBF값 또한 증가하였다. 두 가지 결과는 현재 시험기간에서 발견한 BD모드 고장에 대해 지연 시정조치(Delayed Fixes)를 수행하였을 때 자주 발생한 BD모드 고장들이 다음 시험기간 이후부터는 고장발생 확률이 낮아진다는 의미를 내포하고 있다. 자주 발생한 BD모드들이 시정되고 나면 더 이상 시스템의 고장을 유발시키는 원인들이 적용된 시정유효계수 값만큼 감소된다는 것을 의미한다. 앞서 언급하였듯이 모든 고장을 발견 즉시 시정시키는 BC모드 고장으로 정의하는 것이 이상적이지만 제한된 자원과 제약, 비용적인 측면에 의해 BD모드 고장을 정의할 수 없다. 따라서 Test를 수행하기 이전에 계획단계에서 시스템의 고장을 자주 유발시킬 가능성이 있는 고장들에 대해 BD모드로 정의하는 것이 중요하며 이러한 BD모드 고장들에 대해 적절한 시정유효계수 값을 적용하는 것이 목표하는 MTBF를 달성하는 핵심이라고 할 수 있다.

## References


[1] AMSAA (1981). “MIL-HDBK-189: Reliability Growth Management”.

[2] AMSAA (2011). “MIL-HDBK-189C: Reliability Growth Management”.

[3] Crow, L. H. (2004). “An Extended Reliability Growth Model for Managing and Assessing Corrective Actions”. In Proceedings of RAMS 2004 Symposium, pp. 73-80.

[4] Crow, L. H. (1974). “Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems”. Reliability and Biometry, Statistical Analysis of Lifelength, SIAM, Philadelphia, pp. 379-410.

[5] Crow, L. H. (1982). “An Improved Methodology for Reliability Growth Projections”. APG: AMSAA Technical Report TR-357, Jun 1982.

[6] Crow, L. H. (1983). “Reliability Growth Projection from Delayed Fixes”. In Proceedings of RAMS 1983 Symposium, pp. 84-89.

[7] Duane, J. T. (1962). “Learning Curve Approach to Reliability Monitoring”. IEEE Transactions on Aerospace, Vol. 2, pp. 556-563.

[8] Sung, H. C., Chan, K. P., Sung, I. S., Tae, H. L., and Ki, H. K. (2006). “Reliability Growth Assessment for the Rolling Stock System of the Korea High-Speed Train”. Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 9, No. 5, pp. 606-611.

[9] Won, J. (2002). “Accelerated Life Test and Reliability Growth Management Technique within a Car Program”. Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, Vol. 7, No. 2, pp. 33-39.

[10] Doo, H. K. and Sang, H. K. (2014). “A Study on the Test and Evaluation of the Guided Missile based on Reliability Growth”. Korea Association of Defense Industry Studies, Vol. 21, No. 3, pp. 114-133.

[11] Ho, Y. L., Seok, Y. H., Ahn, H. L. and Chen, S. H. (2005). “A Study of Evaluation Reliability Growth for Korea-Automated Guideway Transit System”. Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 8, No. 6, pp. 597-601.

[12] Jun, H. K. (2006). “A Study on the Optimal LCC using AMSAA Model”. Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol. 29, No. 3, pp. 135-142.

[13] Young, K. S., Young, R. J. and Byeong, J. R. (2013). “Application of Reliability Growth Management for Construction Equipment Development Process”. Journal of the Applied Reliability, Vol. 13, No. 3, pp. 175-190.

[14] Myung, S. K., Jae, W. C. and Jong, S. L. (2013). “A Comparison of Reliability Growth Assessment Models Centered on MIL-HDBK-189C”. Journal of the Applied Reliability, Vol. 13, No. 3, pp. 217-227.

[15] Won, J. and Jun, H. K. (2006). “Practical Application of AMSAA Model in the Product Development Process”. IE Interfaces, Vol. 19, No. 1, pp. 19-25.