

기동장비 신뢰도 성장 관리 연구 : 발사대 체계 사례

이용준* · 배공명* · 허영무* · 서재현* · 김상부**† · 최재경*** · 박우재***

*국방기술품질원 기동화력센터

**창원대학교 산업조선해양공학부

***창원대학교 산업시스템공학과

Reliability Growth Management for Armed Vehicle : Launcher System Case Study

Lee, YJ* · Bae, GB* · Heo, YM* · Seo, JH* · Kim, SB**† · Choi, JK*** · Park, WJ***

*Land Systems Center, Defense Agency for Technology and Quality

**School of Industrial Engineering and Naval Architecture, Changwon National University

***Department of Industrial and Systems Engineering, Changwon National University

ABSTRACT

Purpose: In this study, the reliability growth management procedures for armed vehicle is suggested and an illustrative case study of launcher system is given.

Methods: Crow-AMSAA model is adopted to manage reliability growth of armed vehicle using failure data acquired from development test phase to field operation phase. Between the development test phase and the production phase, the suggested reliability growth procedures for armed vehicle entails accelerated life test of the selected module whose design is changed to improve its reliability for assuring the target system reliability. And it can be verified through estimating the system reliability based on the failure data of field operation phase.

Results: It is shown that the proposed reliability growth management procedures are effective for armed vehicle based on the case study of launcher system. After estimating the reliability of launcher system at every development test, some items are selected to change their designs for improving reliability. Accelerated life test is performed to prove the reliability improvement and finally it is verified through the field operation.

Conclusion: The reliability growth management procedures for armed vehicle is suggested and the case study of launcher system shows it can be effective for managing the reliability growth of the armed vehicle.

Key Words: Armed Vehicle, Launcher System, Reliability Growth Management, Crow-AMSAA Model, Accelerated Life Test

● Received 16 November 2017, 1st revised 19 November, accepted 20 November 2017

† Corresponding Author (sbkim@cwnu.ac.kr)

© 2017, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근 개발되는 무기체계는 과거보다 다양한 성능과 높은 수준의 기능이 요구됨에 따라 설계 및 운용의 복잡성이 높아지고 있으며, 이로 인한 무기체계의 잦은 고장 발생은 무기체계에 주어진 임무를 달성하지 못하거나 요구한 성능을 발휘하지 못하게 함으로 막대한 손실을 초래하고 있다. 또한 무기체계는 설계 단계에서 예측된 신뢰도와 실제 야전 운용 신뢰도 사이에 큰 차이가 존재하는 경우가 많으며, 무기체계 중 기동장비의 경우에도 유사한 문제가 발생하고 있다 (Lee et al. 2016). 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위한 방안의 하나로 신뢰도 성장 관리 (Reliability Growth Management)가 사용되고 있으나, 체계 단위의 시험을 충분히 수행할 수 없는 경우 MIL-HDBK-189C (2011)를 기반으로 하는 신뢰도 성장 관리를 효율적으로 수행하기가 어렵다. 따라서 각 무기체계 별로 적합한 신뢰도 성장 관리 방안을 개발하여 적용하는 것이 필요하다. 이는 기동장비의 경우에도 해당되며, 이 연구에서는 기동장비에 적합한 신뢰도 성장 관리 방안을 제시하고 실제 기동장비 발사대 체계에 대한 신뢰도 성장 관리 방안을 적용하는 사례를 다루었다.

신뢰도 성장 관리의 미국, EU 등 선진국의 군수 및 민수사업에서 오래 전부터 신뢰도 향상을 위해 적용해왔고, 우리나라에서도 신뢰도 성장 관리의 체계 적용이 점차 늘어가는 추세이다. 현재 많은 연구가 체계 적용 사례를 중심으로 이루어지고 있으며 최근에는 장비 또는 체계별로 특화된 신뢰도 성장 관리 방안에 대한 연구도 이루어지고 있다. 다음은 신뢰도 성장 관리 관련 연구 결과 중 일부이다.

Jung et al. (2003)은 체계의 신뢰도 성장을 위하여 제안된 다양한 신뢰도 성장 모형들에 대하여 조사하고 분류하였으며, 신뢰도 성장 모형들 간의 차이와 특성을 바탕으로 모형 선택의 기준을 제시하였다. Kumaraswamy (2002)는 소형 헬기의 프로토타입을 개발하는 과정에서 Duane 모형을 적용하여 시스템의 신뢰도를 추정하고 성장 관리하는 사례 연구를 수행하였다. Lee et al. (2005)은 KRRI (Korea Railroad Research Institute)에서 개발한 무인 운전 고구 차륜형식 AGT (Model : Korea-Automated Guideway Transit)시스템의 주행시험 자료를 AMSAA (Army Materiel Systems Analysis Activity)모형에 적용 및 분석하여 성장률, 적합성검정, 10,000km에서의 순간 및 누적 MKBF (Mean Kilometers Between Failures)등을 추정하였다. Jung (2005)은 철도 차량에 대한 신뢰도 성장 관리를 위하여 AMSAA모형을 적용하는 방안에 대한 연구를 수행하였다. Choi et al. (2006)은 한국형 고속열차 차량시스템에 대해 Duane모형을 적용하여 MKBF 및 성장률을 추정하였다. Chung et al. (2012)는 K계열 무기체계의 야전 고장 데이터를 수집하여 신뢰도 성장 모형에 적용함으로써 무기 체계 및 하위 구성품에 대한 신뢰도를 추정하는 문제를 다루었다. So et al. (2013)은 MIL-HDBK-189A와 RADC-TR-84-20을 기반으로 건설 장비에 대한 신뢰도 관리 프로세스를 개발하고 신뢰도 성장 시험 계획의 수립 방법과 절차를 제시하였다. Kim et al. (2013)은 MIL-HDBK-189C를 중심으로 신뢰도 성장 평가 모델의 비교 연구를 수행하였고, Kim et al. (2014)는 일회성 체계 (One-Shot System)의 FAT (Factory Acceptance Test), DT (Developmental Test) 및 OT (Operational Test)에서의 실패 횟수를 바탕으로 MIL-HDBK-189C (2011)의 Crow-AMSAA 이산형 모형을 적용하여 신뢰도 및 성장률 등을 추정하였다. Lee et al. (2016)은 Crow-AMSAA 신뢰도 성장 모형을 이용하여 K-000(장갑차)에 적용한 사례 연구를 수행하였다. Byun et al. (2017)은 MSR (Matrix-based System Reliability) 방법을 확장하여 k-out-of-N 체계와 같은 복잡한 구조를 갖는 시스템의 신뢰도 성장을 평가하는 방법을 제시하였고 Duane 모형과 비동질적 포아송 프로세스의 가정 하에 고속 열차 시스템에 적용하는 사례를 다루었다. Zhang et al. (2017)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.

2. 기동장비 신뢰도 성장 관리 방안

일반적인 신뢰도 성장 프로세스란 시스템/제품에 대한 신뢰도 목표를 효과적으로 달성하기 위하여 신뢰성 시험을 통해 잠재 고장모드와 원인을 발견하고 시험 중 발견된 고장을 분석하여 개선방안을 찾아 실행하는 일련의 프로세스를 말한다 (Ko et al. 2006). 무기체계의 개발 초기에 목표 신뢰도 및 신뢰도를 달성하기 위해 필요한 자원을 계획하고, Prototype 또는 시스템에 대하여 일련의 개발 및 운용 시험을 수행하고 고장 데이터를 수집하여 분석한 후 의사 결정을 하게 된다. 이러한 시험은 체계 개발의 경우 개발 시험 (DT) 또는 운용 시험 (OT) 단계에서 주로 시행되며 이러한 시험 결과를 분석하여 초도 양산 또는 양산 단계 이전에 성능 중심의 설계 개선이 많이 이루어진다. 그러나 우리나라 방위산업의 현실을 살펴볼 때 체계의 개발 시험단계에서 체계를 대상으로 신뢰도 중심의 설계 개선을 수행하고 시험을 통해 이를 직접 확인하기는 매우 어려운 일이다. 결국 설계 개선의 효과는 체계가 전력화 되어 야전에서 운용된 이후야야 확인이 가능하게 된다. 따라서 우리나라의 방위산업과 같이 체계 개발 일정과 비용에 많은 제약이 존재하는 경우 체계에 대한 신뢰도 개선 입증 시험 대신 체계를 구성하는 핵심 모듈을 대상으로 신뢰도 개선 여부를 확인하는 방안이 더 현실적인 적용 가능한 대안이 될 수 있다.

기동장비의 경우 개발 시험 단계에서 DT, OT, FT (Field Test : 야전 시험)를 수행한 이후 고장 데이터로부터 체계의 신뢰도를 추정한다. 이 때 추정한 체계의 신뢰도가 체계 신뢰도 목표 값을 만족하지 못하는 경우 신뢰도 관점에서 볼 때 개선이 필요한 품목을 선정하고 해당 품목에 대한 신뢰도 개선 설계를 진행하며 가속수명시험 또는 가속 열화시험을 활용하여 추정한 신뢰도를 확인함으로써 양산 및 야전 운용 단계 이전에 체계의 신뢰도를 보증할 수 있다. <Figure 1>은 기존의 체계 개발 및 양산 운용 단계 사이에 핵심 품목에 대한 수명 검증 단계를 추가한 것으로 이를 통해 양산 및 야전 운용 단계의 체계 신뢰도에 대한 보증을 강화할 수 있다.

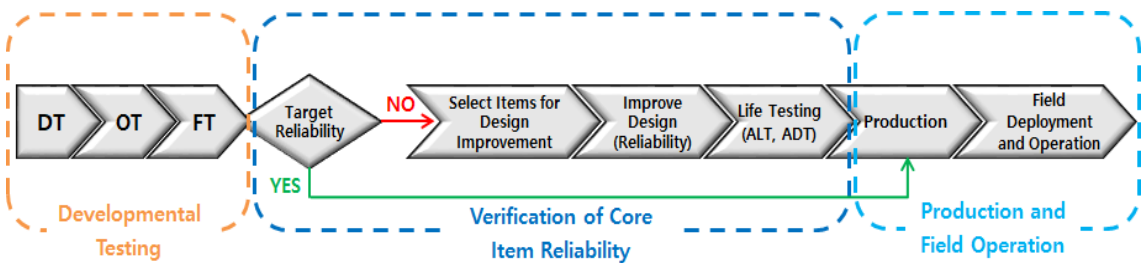


Figure 1. Reliability Growth Management Procedures for Armed Vehicle

3. 기동장비 발사대의 신뢰도 성장 관리 적용 사례

기동장비 발사대는 여러 종류의 탄약을 사용하여 표적을 타격하고 우리 군의 중요 시설을 방호하도록 개발된 전투용 무기체계이다. 기동장비 발사대는 유압식 구동장치와 디지털 제어시스템의 적용으로 발사대의 고각과 방위각을 동시에 구동하기 때문에 사격 반응 시간 및 재장전 시간이 짧은 것이 특징이다. 앞에서 제시한 기동장비 발사대의 핵심 모듈에 대한 수명 검증 단계를 포함한 신뢰도 성장 관리 방안을 발사대에 적용한 결과는 다음과 같다.

3.1 기동장비 발사대의 구성과 적용 범위

기동장비 발사대는 E-BOM (Engineering Bill of Material)을 기준으로 체계 (Level 1), 부체계 (Level 2), 조립체 (Level 3)로 구분할 수 있다. 발사대 체계는 10개의 부체계 ('포탑회전용 링 조립체' 외 9종)로 구성되어 있으며, 각 부체계를 구성하는 조립체 (Level 3)는 여러 모듈들로 구성되어 있다. <Table 1>은 기동장비 발사대를 구성하는 부체계의 품명이다.

Table 1. Subsystems of Launcher System

Level	Items for Each Level	
System (Level 1)	Launcher System	
Subsystem (Level 2)	Ring Assembly, Turret Turning	Electrical Control System
	Revolving Turret for Combat Vehicles	Combat Control System
	Electro-Hydraulic Drive Unit	Radio Set
	Vehicle Frame	Mechanical Hardware Kit
	Weapon Protection Cage	Vehicle Equipment Kit

발사대 체계에 대한 신뢰도 성장 관리 방안 적용 범위는 발사대 체계의 개발 시험 단계에서부터 양산 및 야전 운용 단계까지를 고려하였다. 발사대 체계 각 시험 단계에서 구한 고장 데이터로부터 추정된 발사대 체계 신뢰도와 발사대 체계 신뢰도 목표 값을 비교하여 발사대 체계의 신뢰도 향상이 필요한 경우 발사대를 구성하고 있는 하위 품목 (Level 3 또는 Level 4 품목) 중 신뢰도 개선이 필요한 품목을 선정하였다. 선정된 품목에 대한 설계 개선을 통하여 신뢰도 개선을 수행하였고, 개선된 설계를 반영하여 전력화된 발사대 체계의 야전 운용 단계에서 수집한 고장 데이터를 분석하여 개선된 품목의 신뢰도 향상을 확인하였다. 아울러 기동장비 발사대의 개발 시험 단계부터 야전 운용 단계에 이르는 수명 주기 동안의 신뢰도 성장 변화를 확인하였다.

3.2 기동장비 발사대의 시험 데이터 분석

기동장비 발사대는 20xx년 xx월부터 20xx년 xx월까지 개발시험 (DT)과 운용시험 (OT)을 진행하여 고장 데이터를 수집하였고, 20xx년 xx월부터 20xx년 xx월까지 야전 시험 (FT)을 수행하여 고장 데이터를 수집하였다. 발사대 체계의 각 시험 단계별 신뢰도 추정을 위하여 수집한 고장 데이터에 대한 검토를 수행하였으며 이 과정에서 오류 데이터나 정확하지 않은 고장 데이터를 선별하였다. 고장 데이터 분석에서 제외된 데이터는 주로 고장 기록의 오류

인 경우와 전문가가 판단할 때 고장이 아닌 경우를 포함한다. <Table 2>는 고장 데이터 선별 결과 얻은 기동장비 발사대의 각 시험 단계별 고장 데이터 관련 정보이다.

Table 2. Summary of Launcher System Test Data

	DT	OT	FT
Cumulative Operating Hours	0~270.9 (hrs)	270.9~1,502.2 (hrs)	Varies According to Launcher System No.
Number of Failure Data Used (Number of Failure Data Excluded)	0 (4)	31 (15)	22 (1)

<Table 2>가 나타내고 있는 것처럼 개발 시험 (DT) 단계의 경우에는 가용한 고장 데이터를 구할 수 없었다. 실제로 개발 시험 단계 고장 데이터는 고장이 발생한 운용시간의 누적 값을 확인할 수 없었다. 그러나 운용 시험의 경우 31개, 야전 시험의 경우 22개 고장 데이터를 구할 수 있었으며, 이 고장 데이터를 Crow-AMSAA 신뢰도 성장 추적 모형에 적합시킴으로 각 시험 단계별 발사대 체계의 신뢰도를 추정하였다. 기동장비 발사대의 시험 데이터 분석은 E-BOM을 기준으로 체계 (Level 1)에서 분석 가능한 수준 (Level)까지 품목별로 분류된 고장 데이터를 활용하였으며 추정된 고장 간 평균 시간 간격을 나타내는 MTBF (Mean Time Between Failures) ($\hat{m}(T)$)와 고장 강도 함수 (Failure Intensity Function) ($\hat{\rho}(T)$)를 기준으로 체계의 신뢰도 성장 여부를 확인하였다. 고장 데이터 분석은 ReliaSoft사의 신뢰도 성장 분석 프로그램인 RGA를 이용하였다.

3.2.1 기동장비 발사대의 OT 고장데이터 분석 결과

기동장비 발사대 체계의 운용 시험에서 수집한 31개 고장 데이터를 Crow-AMSAA 신뢰도 성장 추적 모형에 적합하여 분석한 결과 OT단계의 최종 MTBF의 추정 값은 53.4hrs이고, 최종 고장 강도 (Failure Intensity) 추정 값은 0.0187이다. <Figure 2>는 발사대 체계의 시간에 따른 $\hat{m}(T)$ 와 $\hat{\rho}(T)$ 를 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 $\hat{m}(T)$ 는 시간에 따라 증가하고 있고, $\hat{\rho}(T)$ 은 감소하고 있음을 알 수 있다.

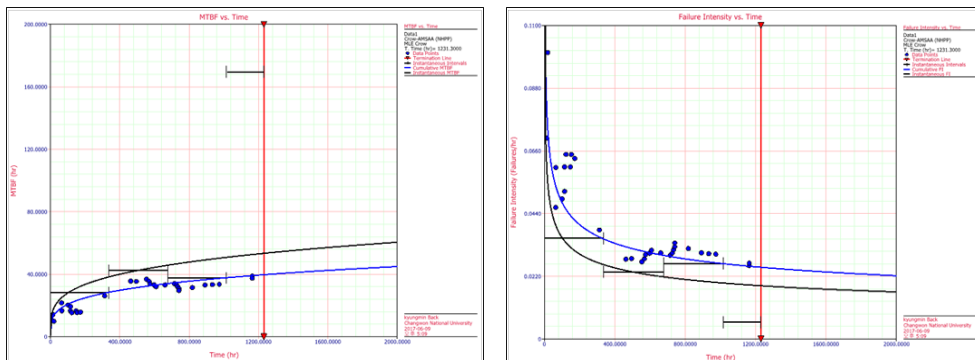


Figure 2. Estimated MTBF and Failure Intensity Functions Based on OT Failure Data

발사대 체계의 OT 고장 데이터 분석 결과 추정된 성장모수 (Growth Parameter) $\hat{\beta}$ 는 0.7434, 성장률 (Growth Rate)은 0.2566이다. Crow-AMSAA 신뢰도 성장 추적 모형에서 $\hat{\beta}$ 값이 0과 1사이의 값을 가질 때는 체계의 신뢰도가 성장한다고 판단하므로 발사대의 OT 고장 데이터를 분석한 결과 얻어진 $\hat{\beta}$ 값 (0.7434)으로 판단해 볼 때 OT 기간 동안 체계의 신뢰도는 성장했다고 볼 수 있다. 단, 시험 기간 동안 발생한 고장에 대해서는 시험-수정-시험 (Test-Fix-Test) 방식의 처리를 수행했다고 가정하였다. <Table 3>은 발사대 (Level 1)를 구성하는 품목들의 신뢰도 추정 값을 정리한 표이다. 그 결과 부체계 (Level 2) 단계에서 ‘케이지, 무기방호용’, ‘구동유니트, 전기유압식’, ‘전투제어시스템’ 순으로 낮은 MTBF가 추정됨을 알 수 있다.

Table 3. Results of Launcher System OT Failure Data Analysis

Level	Item	Number of Failures	$\hat{\beta}$	Growth Rate	$\hat{\rho}(T)$	$\hat{m}(T)$ (hrs)
1	Launcher System	31	0.7434	0.2566	0.0187	53.4
2	Electro-Hydraulic Drive Unit	9	0.7246	0.2754	0.0052	188.8
3	Motor, Hydraulic Pressure	3	0.7192	0.2808	0.0017	570.7
2	Weapon Protection Cage	14	0.6703	0.3297	0.0076	131.2
3	Winch Support Boom	9	0.7176	0.2824	0.0052	190.7
4	Wire Rope Hoist	3	0.4695	0.5305	0.0011	874.2
4	Winch Support Boom	5	0.9275	0.0725	0.0037	265.5
2	Combat Control System	3	0.8380	0.1620	0.0020	489.8
2	Mechanical Hardware Kit	3	0.9370	0.0630	0.0023	438.1

3.2.2 기동장비 발사대의 FT 고장 데이터 분석 결과

기동장비 발사대의 OT 고장 데이터 분석과 마찬가지로 FT (Field Test)에서 수집한 고장데이터 22개를 체계의 수준 및 품목 별로 분류하여 Crow-AMSAA 신뢰도 성장 추적 모형에 적용한 결과, 발사대 체계의 최종 MTBF 추정 값은 57.1hrs이고, 최종 고장 강도 추정 값은 0.0175 이었다. <Figure 3>은 FT 기간 동안 발사대 체계의 시간에 따른 $\hat{m}(T)$ 와 $\hat{\rho}(T)$ 의 변화를 나타낸 그래프이다. FT 고장데이터 분석 결과 추정된 성장 모수 $\hat{\beta}$ 는 1.2854, 성장률은 -0.2854로 나타났다. 즉, $\hat{m}(T)$ 은 시간에 따라 감소하며 $\hat{\rho}(T)$ 은 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 FT에서 수집된 고장 데이터 분석 결과 이 기간 동안 발사대 체계의 신뢰도 성장이 이루어졌다고 판단하기는 어렵다.

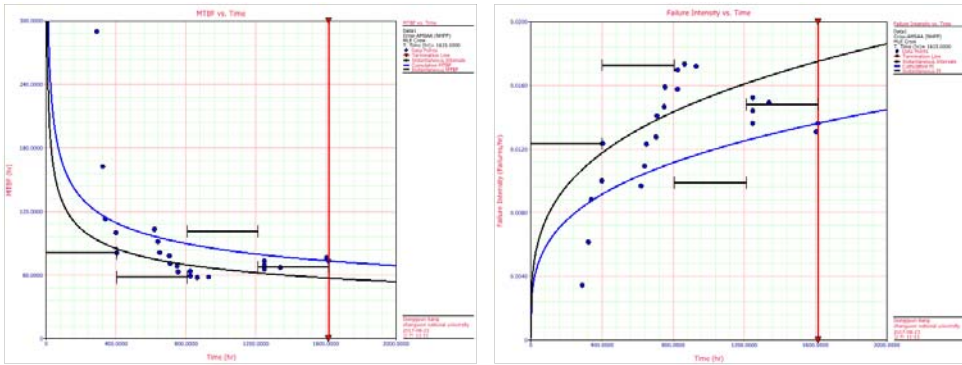


Figure 3. Estimated MTBF and Failure Intensity Functions Based on FT Failure Data

<Table 4>는 FT 고장 데이터를 기준으로 발사대 체계를 구성하는 하위 수준의 품목들에 대한 신뢰도 성장 분석을 수행한 결과이다. 그 결과 부체계 (Level 2) 수준에서 ‘구동유니트, 전기유압식’, ‘전투제어시스템’, ‘케이지, 무기방호용’ 순으로 낮은 MTBF가 추정되었으며, 기동장비 발사대 MTBF 추정 값이 목표 값 (MTBF=100hrs)을 만족하지 못함을 알 수 있다. 따라서 발사대 체계의 신뢰도 개선을 위한 조치가 필요하며 이를 위하여 부체계 혹은 그 하위 수준에서 신뢰도 개선 대상 품목을 선정하였다.

Table 4. Results of Launcher System FT Failure Data Analysis

Level	Item	Number of Failures	$\hat{\beta}$	Growth Rate	$\hat{\rho}(T)$	$\hat{m}(T)$ (hrs)
1	Launcher System	22	1.2855	-0.2855	0.0175	57.1
2	Revolving Turret for Combat Vehicles	3	1.3855	-0.3855	0.0026	388.5
3	Gear Assembly for Decelerator	3	1.3855	-0.3855	0.0026	388.5
2	Electro-Hydraulic Drive Unit	7	1.1048	-0.1048	0.0048	208.8
2	Weapon Protection Cage	5	1.0987	-0.0987	0.0034	294.0
2	Combat Control System	3	2.1042	-1.1042	0.0039	255.8

3.3 신뢰도 개선 대상 품목의 선정 및 설계 개선

운용 시험 (OT)과 야전 시험 (FT) 고장 데이터를 이용하여 구한 각 단계 별 MTBF 추정 값과 부체계의 고장 모드 및 고장 메커니즘 분석 결과, Level 2에 속하는 ‘구동유니트, 전기유압식’, ‘케이지, 무기방호용’, ‘전투제어시스템’이 신뢰도 개선 대상 품목으로 선정되었으며 신뢰도 개선 대상 품목에 대한 가속수명시험 및 가속열화시험을 수행하여 기동장비 발사대의 신뢰도 향상을 진행하였다. 그러나 이 연구에서는 ‘구동유니트, 전기유압식’ (Level 2) 부체계에 대한 설계 개선과 수명 검증을 중심으로 신뢰도 성장 관리 방안 적용 절차를 보였다. ‘구동유니트, 전기유압식’ (Level 2) 부체계를 구성하는 Level 3 단위에서 가장 고장률이 높게 추정된 ‘전동기, 유압식’ 품목이 신뢰도 설계 개선 대상 품목으로 최종 선정되었다.

‘전동기, 유압식’ 품목의 주요 기능 및 용도는, 서보 밸브 (Servo Valve)에 의한 유압동력의 유량 및 방향 제어에 의한 요크의 경사각 조절, 요크의 경사각에 따라 유압 서보모터의 회전방향 및 속도 제어, 압력스위치로 모터 내의 압력을 감지하여 사격통제장치로 전달하는 것 등이다. ‘전동기, 유압식’ 품목의 고장모드를 분석한 결과 전동기의 압력을 인가할 때 다이어프램의 손상으로 인해 정상 압력을 확인하지 못하는 경우 압력스위치에서 누유 현상이 발생하는데 이를 ‘전동기, 유압식’의 고장으로 정의하였다. 이러한 ‘전동기, 유압식’의 고장모드를 해결하기 위해서 피스톤과 얇은 막으로 이루어진 다이어프램의 접촉부인 모서리의 R값을 변경하는 것을 포함한 설계 변경을 수행하였다. (Figure 4 참조)

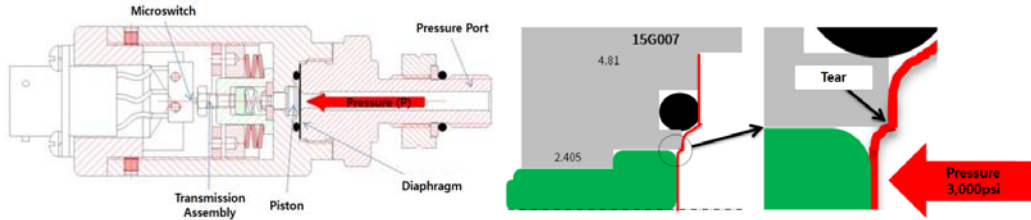


Figure 4. ‘Motor, Hydraulic Pressure’ and Design Improvement

3.4 가속수명시험을 이용한 수명 검증

발사대를 구성하는 부체계 가운데 ‘구동유닛 전기유압식’의 하위 품목인 ‘전동기, 유압식’ (Level 3 조립체)의 주요 고장모드는 시스템의 높은 압력으로 인한 압력스위치의 미작동이며, 이를 고려한 ‘전동기, 유압식’ 품목에 대한 가속수명시험의 설계는 다음과 같다.

가속 인자는 시스템에 인가되는 압력이며 사용조건에서 압력은 3,000psi이다. 가속수명시험에 고려한 인자의 스트레스 수준은 모두 3수준으로, 각각 사용조건의 1.2배인 3,600psi, 1.4배인 4,200psi, 그리고 1.5배인 4,500psi로 정하였다. 그리고 각 스트레스 수준에서 시험한 샘플 수는 3개이다. <Figure 5>는 ‘전동기, 유압식’의 가속수명시험 장치와 장치 구성도를 보여 준다.

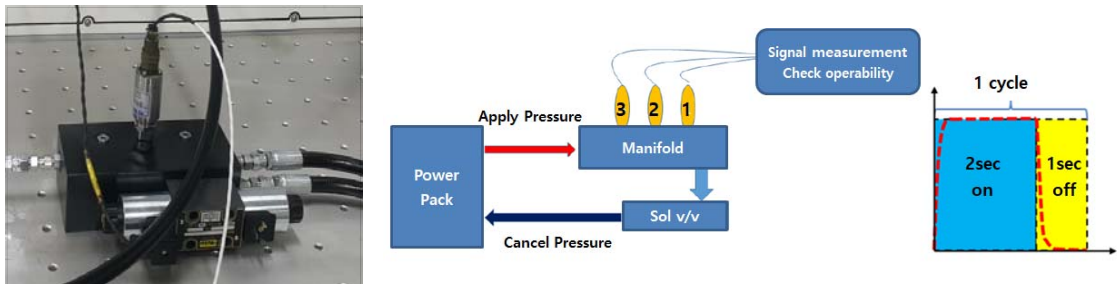


Figure 5. ALT Device and Configuration for ‘Motor, Hydraulic Pressure’

‘전동기, 유압식’의 가속수명시험 장치는 압력을 인가하는 Power Pack, 시험 횟수를 제어하는 제어 프로그램, 압력스위치를 장착한 매니폴더, 압력을 해제하는 Solenoid Valve, 기타 유압호스 및 케이블로 구성되어 있다. 가속수명시험 방법은 매니폴더에 압력스위치를 장착하고, 각 커넥터에 케이블을 연결한 후 가속인자인 압력을 인가(스위치 on)/해제(스위치 off)하는 시험을 반복하여 고장이 발생하기까지의 Cycle수를 측정하는 것이다. 이러한 방법으로 ‘전

동기, 유압식'의 가속수명시험을 진행한 결과는 <Table. 5>와 같다.

Table 5. ALT Failure Data of 'Motor, Hydraulic Pressure' (Cycles)

Stress Level (Pressure)		
4,500 psi	4,200 psi	3,600 psi
7,314	7,106	15,902
8,367	8,904	36,200
17,490	13,596	39,328

시스템에 인가하는 압력을 가속인자로 사용하는 '전동기, 유압식'에 대한 가속수명시험 모델로 역승모델 (Inverse Power Law Model)을 사용하였으며, 각 가속 수준에서의 수명 분포는 와이블분포를 가정하였다.

'전동기, 유압식'에 대한 가속수명시험의 각 스트레스 수준에서의 고장 발생 메커니즘과 고장 데이터의 와이블 플롯으로부터 스트레스 수준 간에 가속성이 존재함을 확인할 수 있었으며, 고장 데이터 분석 결과는 <Figure 6>과 같다. 가속수명시험 고장 데이터의 분석은 ReliaSoft사의 Weibull++ /ALTA 소프트웨어를 사용하였다. 가속수명시험 고장 데이터 분석 결과, 사용조건 3,000psi에서 추정된 와이블분포의 척도모수 $\hat{\eta}$ 는 72,241.1이며, 형상모수 $\hat{\beta}$ 은 2.6159이다. 또한 '전동기, 유압식'의 사용 조건에서 추정된 MTBF 값은 64,177.0Cycles이며 B₁₀수명 추정 값은 30,561.1Cycles이다 (Figure 6 참조). '전동기, 유압식'의 1일 평균 운용시간이 8시간이며 시간당 평균 20Cycles을 운용한다는 조건으로부터 MTBF와 B₁₀수명 추정 값을 시간 단위로 변경하면 각각 25,670.8hrs와 12,224.5hrs가 된다. 또한 MTBF와 B₁₀수명에 대한 95% 단측 신뢰하한 (Lower Confidence Bound)은 각각 (33,286.3Cycles, 13,314.5hrs)와 (14,407.1Cycles, 5,762.8hrs)이다.

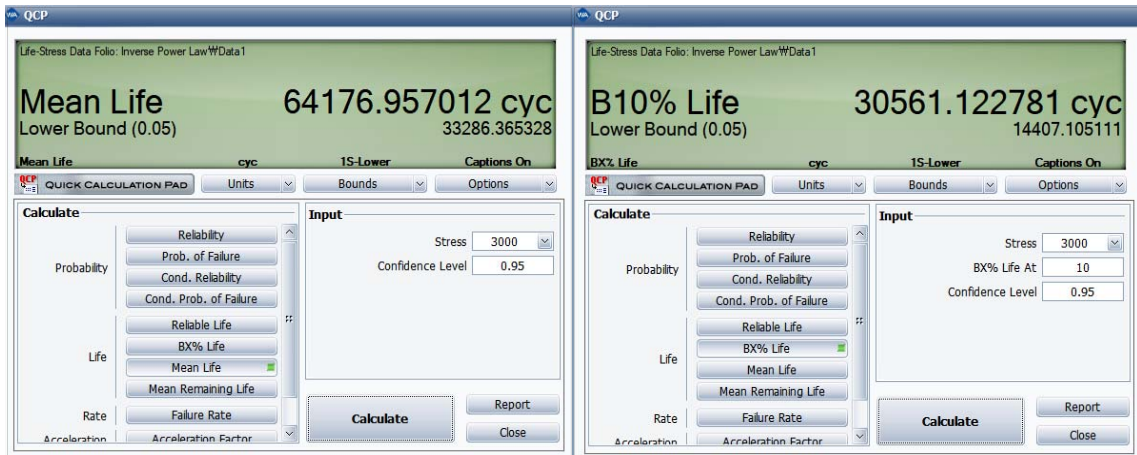


Figure 6. Results of ALT Failure Data Analysis Using Weibull++/ALTA SW

3.5 기동장비 발사대의 야전 운용 데이터 분석

기동장비 발사대의 시험 단계 고장 데이터를 분석한 결과 선정된 신뢰도 개선 대상 품목에 대한 설계 변경 등의 개선이 진행된 이후 '전동기, 유압식'을 포함한 여러 Level 3, Level 4 품목에 대한 가속수명시험 또는 가속열화시험

을 수행하였다. 가속수명시험 또는 가속열화시험을 통해 신뢰도 개선이 검증된 설계를 발사대 체계에 반영한 이후 야전에 배치되어 운용된 기동장비 발사대에 대한 고장 데이터를 수집하고 분석을 수행하였다.

야전에 배치된 발사대의 호기별 운용 고장 데이터 분석을 진행하기 위해서 각 호기별 누적 운용 시간 및 고장 데이터를 구분하였고, 발사대 체계에서 분석 가능한 수준 (Level)까지 구분한 고장 데이터를 Crow-AMSAA 신뢰도 성장 추적 모형에 적합하였다. <Table 6>은 야전에 배치된 발사대의 운용 데이터를 분석한 결과이다. 야전 운용 데이터를 분석한 결과 발사대 (Level 1)의 MTBF $\hat{m}(T)$ 는 228.9hrs였다. 이러한 결과는 발사대 체계의 목표 신뢰도 (MTBF=100hrs)를 만족하며 OT와 FT 단계의 신뢰도 추정 값보다 높아졌음을 알 수 있다.

Table 6. Results of Launcher System Field Operation Failure Data Analysis

Level	Item	Number of Failures	$\hat{\beta}$	Growth Rate	$\hat{\rho}(T)$	$\hat{m}(T)$ (hrs)
1	Launcher System	96	0.7800	0.2200	0.0044	228.9
2	Revolving Turret for Combat Vehicles	7	0.6318	0.3682	0.0003	3,269.4
3	Revolving Turret for Combat Vehicles	3	0.6661	0.3339	0.0001	7,235.1
3	Gear Assembly for Decelerator	4	0.6082	0.3918	0.0002	5,942.8
2	Electro-Hydraulic Drive Unit	24	0.6510	0.3490	0.0011	925.4
3	Motor, Hydraulic Pressure	3	0.2802	0.2049	0.0001	17,200.6
3	Hydraulic Manifold Assembly	5	0.7310	0.2690	0.0003	3,955.7
4	Filter Element for Fluid	3	1.1365	-0.1365	0.0002	4,240.4
3	Oil Tank for Hydraulic Equipment	3	0.7583	0.2417	0.0002	6,355.4
2	Weapon Protection Cage	29	0.6544	0.3456	0.0013	761.9
3	Winch Support Boom	23	0.7097	0.2903	0.0011	885.8
4	Motor, Direct Current	3	9.5320	-8.5320	0.0020	505.6
4	Winch Support Boom	8	2.6660	-1.6660	0.0015	677.9
4	Wire Rope Hoist	7	0.4546	0.5454	0.0003	3,975.7
3	Electronic Component Assembly	3	0.4288	0.5711	0.0001	11,238.4
2	Electric Control Device	10	0.0585	0.4633	0.0004	2,693.8
3	Cable Assembly, Special Application	9	0.5328	0.4672	0.0003	3,015.2
2	Combat Control System	15	0.7723	0.2277	0.0008	1,248.1
3	Control Device for Guided Missile Launch	5	0.4661	0.5339	0.0002	6,203.8
3	Launch Control Unit for Guided Missile	7	0.8960	0.1040	0.0004	2,305.2

가속수명시험을 통해 신뢰도 향상을 확인한 ‘전동기, 유압식’ 품목에 대한 MTBF 변화를 구해 보면 <Figure 7>과 같다. 설계 개선이 이루어지기 이전에 실시한 OT와 FT 고장 데이터를 신뢰도 성장 모형에 적용하여 추정된 MTBF $\hat{m}(T)$ 는 635.6hrs이며, 설계 개선 이후 야전 운용 단계에서 수집한 고장 데이터를 분석하여 추정된 MTBF $\hat{m}(T)$ 는 17,200.6hrs이다. 설계 개선 이후 실시한 ‘전동기, 유압식’에 대한 가속수명시험 결과 추정된 MTBF 25,670.8hrs와 B₁₀수명 추정 값 12,224.5hrs를 설계 개선 전의 MTBF 추정 값과 비교해 볼 때 설계 개선을 통한 신뢰도의 성장이 충분함을 알 수 있다.

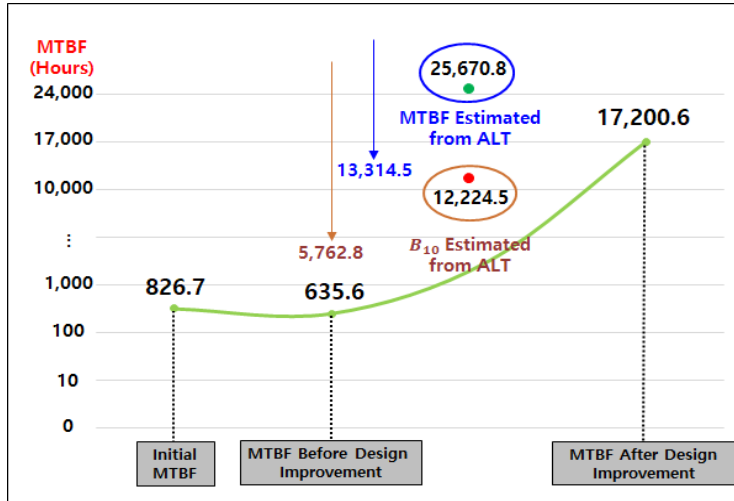


Figure 7. Estimated MTBF's Before and After Design Improvement of 'Motor, Hydraulic Pressure'

기동장비 발사대 체계에 대한 각 단계별 신뢰도 성장 변화에 대한 모니터링 결과는 <Figure 8>과 같다. 발사대 체계에 대한 RAM 분석 보고서에서 예측한 MTBF 값의 10%를 초기 단계의 MTBF로 설정하고 (Hemenway 1978) OT 단계를 Stage 1, FT 단계를 Stage 2, 야전 운용 단계를 Stage 3으로 구분하여 단계별 신뢰도 성장 변화를 구하였다.

<Figure 8>은 Stage 1인 운용 시험 단계와 Stage 2인 야전 시험 단계에서 발사대 체계의 목표 신뢰도 값을 만족하지 못하고 있음을 보여준다. 그러나 Stage 2 이후 체계의 신뢰도 개선을 위하여 Level 3 혹은 Level 4 단위의 품목을 대상으로 신뢰도 개선을 수행한 이후 야전 운용 단계에서 발사대 체계의 MTBF 추정 값이 목표 신뢰도를 충분히 만족함을 보여준다. 실제로 Stage 2 이후 체계 신뢰도 개선을 위한 대상 품목 선정과 설계 개선을 수행하였고, 발사대 체계 단위에서 수명 검증을 하는 대신 해당 품목 단위에서 가속수명시험과 가속열화시험을 통한 수명 검증을 실시하였다. 수명 검증을 확인한 신뢰도 개선 품목의 체계 적용을 진행하였으며 체계 단위에서의 신뢰도 개선 효과는 야전 운용 고장 데이터로부터 확인하였다.

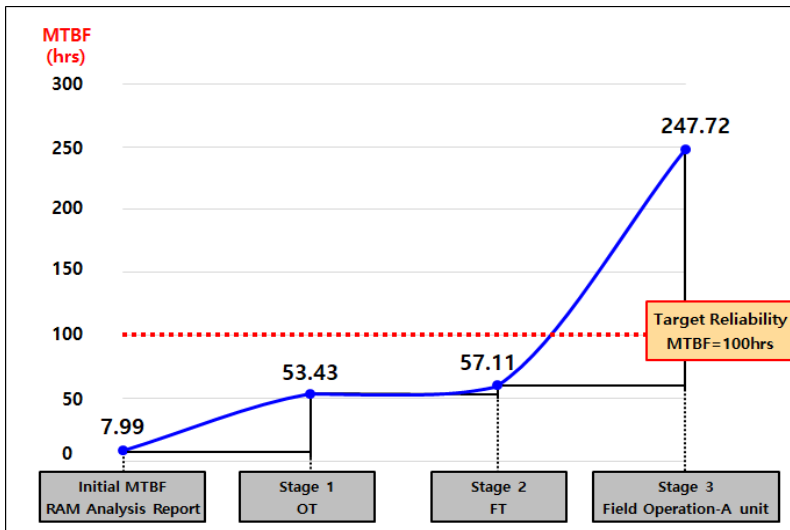


Figure 8. Reliability Growth of Launcher System

4. 결 론

이 연구에서는 기동장비에 대한 신뢰도 성장 관리 방안을 제시하고, 이를 발사대 체계에 적용하여 제시한 신뢰도 성장 관리 방안이 효과적으로 활용될 수 있음을 보였다.

기동장비의 개발 시험 단계 이후 양산 및 야전 운용 단계 이전에, 개발 시험 데이터로부터 체계의 신뢰도 값을 추정하고 추정 값이 체계의 목표 신뢰도 값을 만족하지 못하는 경우 시험 고장 데이터 분석으로부터 Level 3 혹은 Level 4의 신뢰도 개선 품목을 선정하고 해당 품목에 대한 설계 개선과 가속수명시험 (또는 가속열화시험)을 통해 신뢰도 성장을 확인하는 절차를 포함하였다. 개발 시험과 이후 단계에서 시험 대상이 주로 체계인 것을 체계 하위 수준으로 시험 대상을 넓힘으로 실제적인 접근을 가능하게 하였다.

또한 기동장비의 신뢰도 성장 관리 절차를 발사대 체계에 적용한 사례 연구를 통해 제시한 절차의 적용 가능성을 보였다. 발사대의 신뢰도 성장 관리 모형으로 Crow-AMSSA 추적 모형을 사용하였으며, 운용시험 (OT), 야전시험 (FT) 및 야전 운용 고장 데이터 분석을 통해 MTBF 값의 변화를 확인하였다. Level 4 품목인 ‘전동기, 유압식’을 대상으로 가속수명시험을 수행하여 설계 개선에 따른 신뢰도 개선 검증 절차를 보였으며, 복합적으로 이루어진 많은 설계 개선으로 인한 발사대 체계의 신뢰도 성장을 확인하였다.

REFERENCES

- Byun, J. E., Noh, H. M., and Song, J. 2017. "Reliability Growth Analysis of k-out-of-N Systems Using Matrix-based System Reliability Method." *Reliability Engineering & System Safety* 165: 410-421.
- Choi, S. H., Park, C. K., Seo, S. I., Lee, T. H., and Kim, K. H. 2006. "Reliability Growth Assessment for the Rolling Stock System of the Korea High-Speed Train." *Journal of the Korean Society for Railway* 9(5):606-611.
- Chung, I. H., Lee, H. Y., and Park, Y. I. 2012. "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* 40(3):278-285.
- Hemenway, D. F., and Navid, B. N. 1978. "Reliability of Naval Radar Systems." Naval Research Laboratory.
- Jung, W., Kim, J. H., and Yoo, W. J. 2003. "A Classification and Selection of Reliability Growth Models." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 31(1):11-20.
- Jung, W. 2005. "Practical Reliability Growth Management for RAM Growth Monitoring." *Proceeding of the Korean Society for Railway (Autumn Conference)* 258-263.
- Kim, M. S., Chung, J. W., and Lee, J. S. 2013. "A Comparison of Reliability Growth Assessment Models Centered on MIL-HDBK-189C." *Journal of Applied Reliability* 13(3):217-227.
- Kim, M. S., Chung, J. W., and Lee, J. S. 2014. "A Reliability Growth Prediction for a One-Shot System Using AMSAA Model." *Journal of Applied Reliability* 14(4):225-229.
- Ko, J., Lee, S. K., Kwon, S. H., Noh, T. S., Chung, W., Park, C. G., and Kim, M. S. 2006. "Reliability Growth Program." *Journal of Applied Reliability* 6(1):13-25.
- Kumaraswamy, K. G. 2002. "Reliability Growth Management during Prototype Development." *Defence Science Journal* 52(4):385-392.
- Lee, C. H., Ku, Y. S., Hong, H. E., Jung, I. H., Park, D. I., and Kim, S. B. 2016. "A Study on Reliability Program of the Armed Vehicles." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 44(3):565-574.
- Lee, H. Y., Han, S. Y., Lee, A. H., and Ha, C. S. 2005. "A Study of Evaluation Reliability Growth for Korea-Automated Guideway Transit System." *Journal of the Korean Society for Railway* 8(6):597-601.
- So, Y. K., Jeon, Y. R., and Ryu, B. J. 2013. "Application of Reliability Growth Management for Construction Equipment Development Process." *Journal of Applied Reliability* 13(3):175-190.
- U.S. Department of Defense. 2011. "MIL-HDBK-189C."
- Zhang, J., Sun, F. B., and Sarakakis, G. 2017. "Field Reliability Growth Modeling for Automotive." *Proceeding of Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 23-26.

