

가속수명시험을 이용한 다련장 발사대 신뢰도 성장 연구

이용준^{*,1)} · 류정민¹⁾ · 손권일¹⁾ · 송석봉¹⁾ · 김상부²⁾ · 박우재²⁾

¹⁾ 국방기술품질원 기동화력센터

²⁾ 창원대학교 산업조선해양공학부

A Study on the Reliability Growth of Multiple Launch Rocket System Using Accelerated Life Testing

Yongjun Lee^{*,1)} · Jeongmin Ryu¹⁾ · Kwonil Son¹⁾ · Seokbong Song¹⁾ · Sangboo Kim²⁾ · Woojae Park²⁾

¹⁾ Land Systems Center, Defense Agency for Technology and Quality, Korea

²⁾ School of Industrial Engineering and Naval Architecture, Changwon National University, Korea

(Received 19 September 2018 / Revised 28 November 2018 / Accepted 8 February 2019)

ABSTRACT

In this paper, we aim to check the reliability growth of multiple launch rocket components by the life evaluation. We apply the Crow-AMSAA model to the sets of test data obtained from the development phase. The result of the data analysis shows that the reliability of some components needs to be improved. In order to improve their reliability, we analyze the failure mechanism and change their designs. The verification of the reliability growth for those components is done by analyzing the data sets obtained by the accelerated life tests. As a result, we show that the MTBF of those components is increased and also their reliabilities improved.

Key Words : Accelerated Life Testing(가속수명시험), Reliability Growth Management(신뢰도 성장 관리), Multiple Launch Rocket System(다련장 발사대 시스템)

1. 서론

무기체계는 장기간의 수명주기를 갖는 군수품으로 유사시 극한 환경에서 임무를 반드시 완수해야 하는 미션 크리티컬(Mission-Critical) 장비로서 잠재결함 발생의 최소화를 위한 신뢰성 검증의 필요성이 높게 요구되고 있다. 또한 무기체계는 군수사업 구조특성 상

민수사업 대비 높은 생산비용, 소량생산 등의 특수한 생산요건 때문에 설계단계에서 충분한 내구성 검증이 부족하여 예측된 신뢰도와 실제 야전 운용 신뢰도 사이에 큰 차이가 존재하는 경우가 많다. 이러한 문제를 효과적으로 해소시키기 위한 방안으로 신뢰도 성장관리 기법이 활용되고 있다¹⁾. 신뢰도 성장 프로세스란 특정 시스템 및 제품에 대해 설정된 신뢰도 목표를 효과적으로 달성하기 위하여 신뢰성 시험을 통해 잠재 고장모드와 원인을 발견하고 시험 중 발견된 고장을 분석하여 개선방안을 수립하고 수행하는 일련의

* Corresponding author, E-mail: yjlee@dtaq.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

프로세스를 의미한다^[2].

무기체계의 경우 개발초기에 산출한 목표 신뢰도의 달성을 위해 필요로 하는 자원 계획단계를 거쳐, 프로토타입(Prototype) 또는 시스템에 대하여 일련의 개발 및 운용 시험을 통해 고장 데이터를 수집하고 분석을 통해 의사결정을 하는 프로세스를 따른다. 이러한 활동은 체계개발의 경우 개발시험 또는 운용시험 단계에서 주로 시행되며 시험결과 분석을 통해 초도양산 또는 후속양산 단계 이전에 성능 중심의 설계 개선이 많이 이루어진다.

그러나 개발일정, 예산문제 등의 현실적인 제약사항으로 인해 체계개발 시험단계에서 체계를 대상으로 신뢰도 중심의 설계개선 및 시험활동을 수행하는 것은 매우 어려운 것이 현실이다. 결국 설계개선의 효과는 체계가 생산 및 납품된 후 직접 운용되는 야전에서 확인이 가능하게 된다. 따라서 우리나라의 방위산업과 같이 체계개발 일정과 비용에 많은 제약이 존재하는 경우에는 체계에 대한 신뢰도 개선 입증시험 대신 체계를 구성하는 핵심모듈을 대상으로 신뢰도 개선 여부를 확인하는 방안이 더 현실적으로 적용 가능한 대안이 될 수 있다^[3]. 개발 시험평가 단계의 고장 데이터를 분석하여 추정된 체계 신뢰도가 목표 신뢰도를 만족하지 못할 경우, 체계 하위품목 중 신뢰도 관점에서 개선이 필요한 품목을 선정하여 설계개선 및 신뢰도 개선시험을 수행하고 하위부품 단위에서의 신뢰도 향상을 확인함으로써 양산 단계 이전의 체계 신뢰도에 대한 보증을 강화할 수 있다.

본 연구에서는 개발 시험평가 단계 신뢰도 분석을 통하여 신뢰도 개선이 필요한 대상을 선정하고 설계개선 후 가속수명시험을 수행하여 신뢰도 성장을 검증하는 절차를 보였다. 고장데이터를 분석하여 체계 구성 품목 중 개선이 필요한 핵심 품목을 선정하고, 고장메커니즘 분석 및 설계개선을 수행하였다. 고장모드 분석으로 가속인자 및 가속수준을 결정하고 가속수명시험을 수행하였다. 수명시험 데이터로부터 수명분포를 분석하고 개선된 신뢰도를 확인하였다.

2. 다련장 발사대 체계 신뢰도 분석

2.1 다련장 발사대 시험데이터 분석

다련장 발사대 체계(Level 1)는 구동유니트, 전투제어시스템 등 총 10개의 부체계(Level 2)로 구성되어

Table 1. Summary of failure data

	OT	FT
누적운용시간	270.9~1,502.2	호기별 상이
고장데이터 수	31	22

있다. 다련장 발사대 체계에 대한 신뢰도 분석을 위하여 개발시험 단계부터 야전시험 단계까지 고장데이터를 수집하였다. 개발단계 신뢰도 추정을 위해 고장데이터를 수집 및 검증하였고, Table 1과 같이 신뢰도 분석을 수행할 수 있는 수준의 고장데이터를 획득할 수 있었다. 개발단계 시험평가는 개발시험인 DT(Development Test), 운용시험인 OT(Operation Test), 야전시험인 FT(Field Test)로 구성되며, 신뢰도 분석을 위하여 DT 단계에서의 가용한 고장 데이터는 획득할 수 없었다.

고장데이터를 Crow-AMSAA 신뢰도 성장 추적 모형^[4]에 적용하여 각 시험 단계별 다련장 발사대 체계의 신뢰도를 추정할 수 있었다. 다련장 발사대의 시험 데이터 분석은 E-BOM을 기준으로 체계단위(Level 1)에서 분석 가능한 하위단위까지 품목별로 분류된 고장데이터를 활용하였고, 추정된 고장간 평균시간 간격을 나타내는 MTBF(Mean Time Between Failures) ($m(T)$)를 기준으로 체계의 신뢰도 성장 여부를 확인하였다. 고장데이터 분석은 ReliaSoft사의 신뢰도 성장 분석 프로그램인 RGA(Reliability Growth Analysis)를 이용하였다. 시간 t 에서 고장 강도 함수(Failure Intensity Function) $\rho(t)$ 는 아래의 식 (1)과 같이 2개의 모수를 가지는 와이블 고장률 함수로 근사시켜 나타낸다. 여기서, β 는 형상모수(Shape Parameter), λ 는 척도모수(Scale Parameter)이다.

$$\rho(t) = \lambda \beta t^{\beta-1}, t > 0, \lambda > 0, \beta > 0 \quad (1)$$

또한, 순간 평균 고장시간(MTBF)를 $m(T)$ 라고 하면 식 (2)와 같다. 여기서, T 는 총 시험시간이다.

$$m(T) = \rho(T)^{-1} = \frac{1}{\lambda \beta T^{\beta-1}} \quad (2)$$

2.2 고장데이터 분석 결과

다련장 발사대 체계의 OT에서 수집한 31개의 고장데이터에 Crow-AMSAA 신뢰도 성장 추적 모형을 적

용하여 분석하였다.

Fig. 1은 다련장 발사대 체계의 시간에 따른 MTBF 추정 값 $m(T)$, Fig. 2는 고장강도 추정 값 $\rho(t)$ 에 대한 분석결과를 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 $m(T)$ 는 시간에 따라 증가하고 있고, $\rho(t)$ 은 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 결과적으로, OT단계의 체계 MTBF의 추정 값은 53.4 hrs로 산출되었고, 체계 고장강도 추정 값은 0.0187로 산출되었다.

Table 2는 Level 1 다련장 발사대를 구성하는 품목들의 신뢰도 추정 값들을 나타낸 표이다. Level 2 단위 기준에서는 ‘케이지, 무기방호용’, ‘구동유니트, 전기유압식’, ‘전투제어시스템’ 순으로 MTBF가 낮은 것으로 추정된다.

Table 2. Results of launcher system OT failure data analysis

Level	품명	$m(T)$ (hrs)
1	기동장비 발사대	53.4
2	구동유니트, 전기유압식	188.8
3	전동기, 유압식	570.7
2	케이지, 무기방호용	131.2
3	봄, 권양기지지용	190.7
4	호이스트, 와이어로프식	874.2
4	봄, 권양기지지용	265.5
2	전투제어시스템	489.8

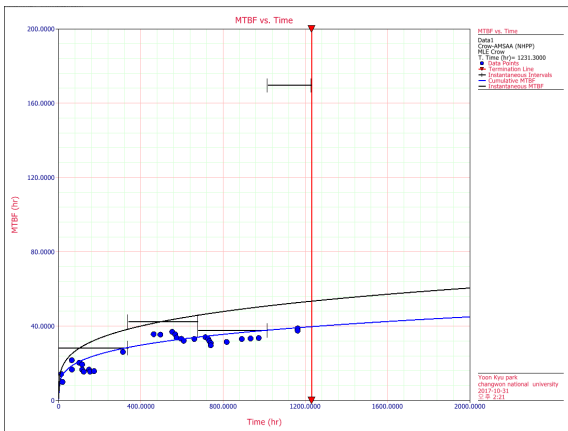


Fig. 1. Estimated MTBF based on OT failure data

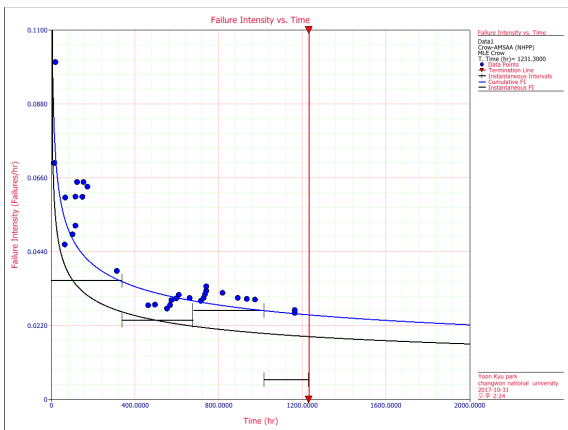


Fig. 2. Failure intensity functions based on OT failure data

다련장 발사대의 운용시험 고장 데이터 분석과 마찬가지로 FT에서 수집한 고장데이터 22개를 품목 및 단위별로 분류하여 Crow-AMSAA 신뢰도 성장 추적 모형을 적용한 결과, 다련장 발사대 체계의 최종 MTBF 추정 값은 57.1 hrs로 산출되었고, 최종 고장강도 추정 값은 0.0175로 산출되었다. FT 기간 동안 다련장 발사대 체계의 시간에 따른 MTBF 추정 값 $m(T)$ 를 Fig. 3에 나타냈고, Fig. 4에는 고장강도 $\rho(t)$ 의 변화를 나타낸 그래프를 나타냈다.

Table 3은 FT 고장 데이터를 기준으로 다련장 발사대 체계를 구성하는 하위 수준의 품목들에 대한 신뢰도 성장 분석을 수행한 결과이다. Level 2 단위 기준에서 ‘구동유니트, 전기유압식’, ‘전투제어시스템’, ‘케

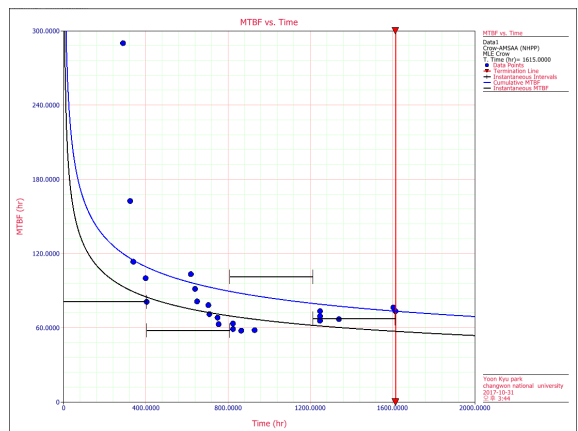


Fig. 3. Estimated MTBF based on FT failure data

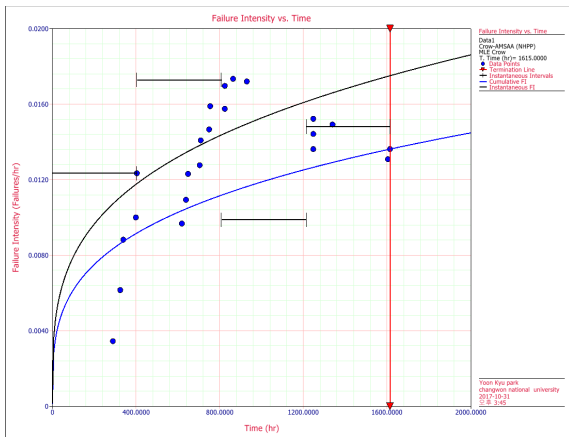


Fig. 4. Failure intensity functions based on FT failure data

Table 3. Results of launcher system FT failure data analysis

Level	품명	$\hat{m}(T)$ (hrs)
1	기동장비 발사대	57.1
2	회전포탑, 전투차량용	388.5
3	기어조립체, 감속기용	388.5
2	구동유니트, 전기유압식	208.8
2	케이지, 무기방호용	294.0
2	전투제어시스템	255.8

이지, 무기방호용' 순으로 MTBF가 낮은 것으로 추정되었으며, 다련장 발사대 MTBF 추정 값이 목표 값 (MTBF = 100 hrs)을 만족하지 못함을 확인할 수 있다.

OT와 FT 고장데이터를 분석한 결과, 다련장 발사대 체계의 MTBF가 목표값을 만족하지 못하여 성장 관리가 필요하며, $m(T)$ 이 낮은 품목 중 구동유니트와 전투제어시스템에 대하여 고장분석, 설계개선 및 가속수명시험을 수행하였다.

3. 고장분석 및 설계개선

3.1 구동 유니트

설계개선 대상품목인 구동 유니트의 신뢰도를 향상

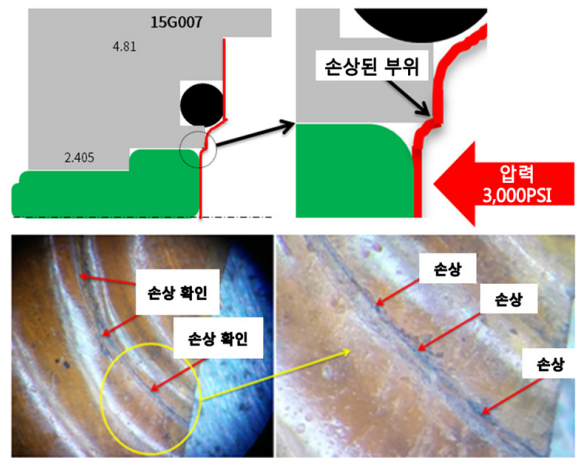


Fig. 5. Diaphragm damage area

시키기 위해 구동 유니트(Level 2)의 하위부품 중 고장이 빈번히 발생하는 유압 전동기(Level 3)를 개선하고자 하였다.

발사대 구동 과정에서 유압 전동기는 유압동력의 유량 및 방향에 따른 요크의 경사각을 제어하는 기능, 요크의 경사각에 따른 유압서보모터의 회전방향 및 속도를 제어하는 기능, 하위부품 압력스위치를 통해 모터 내부압력을 감지하여 사격통제장치로 전달하는 기능을 수행한다.

유압 전동기의 고장은 누유로서 Fig. 5와 같이 전동기에 압력이 인가될 때 내부 압력스위치의 다이어프램이 반복적인 모서리 접촉에 의해 손상되고 압력이 정상적으로 전달되지 못하여 누유가 발생하게 되었다. 이를 통해 유압 전동기의 고장모드는 다이어프램의 손상으로 추정할 수 있으며, 피스톤과 얇은 막으로 이루어진 다이어프램의 접촉부인 모서리 R을 크게 하고 모서리부 미세 burr 제거 공정 추가를 통하여 개선하였다.

3.2 전투제어시스템

전투제어시스템의 신뢰도 성장을 위해 전투제어시스템(Level 2)을 구성하는 하위부품 중 고장 발생의 주요 원인이 되는 발사통제장치(Level 3)를 개선하였다.

발사대의 구동에서 발사통제장치는 표적 정보에 대한 사격제원 산출기능, 로켓포드 점검 및 식별기능, 사격명령 처리 및 발사임무 상태 전달기능, 로켓포드 연결케이블 점검기능, 신관 신호 장입 등과 같은 발사대를 제어하는 기능을 수행한다.

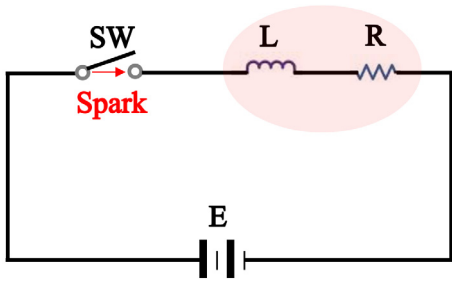


Fig. 6. Relay circuit on the fire control computer

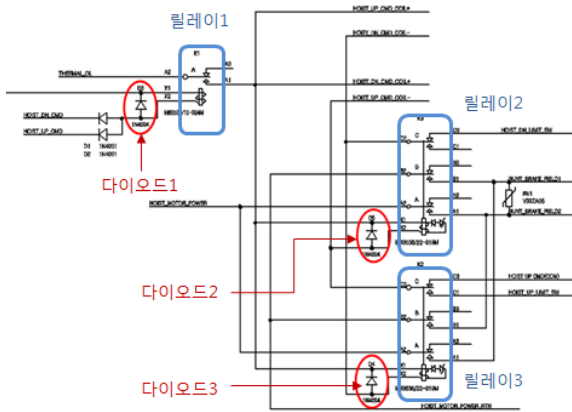


Fig. 7. The circuit with the diode connections

발사통제장치의 고장모드는 Fig. 6과 같이 유압 전동기의 인양기가 작동 될 때 회로도 구성상 발생하는 역기전력에 의해 발사대 제어장치 내부의 릴레이 스위치가 소착되어 제어불능에 의해 인양기가 멈추지 않는 현상이다.

발사통제장치의 고장모드인 인양기를 작동 시 발생 되는 서지 전압을 제거하기 위해 Fig. 7과 같이 회로도에 다이오드를 추가하여 설계를 개선하였다.

4. 가속수명시험 및 수명분석

가속수명시험은 시험 대상품목의 신뢰도에 따라 상당한 시험비용, 시료수, 시험기간이 요구될 수 있는 현실적인 문제를 극복하기 위해 가혹한 조건에서 스트레스를 인가하여 시험 대상품목의 수명을 추정하는 시험방식이다. 본 연구에서는 설계를 개선한 구동 유닛의 압력스위치와 전투제어시스템의 릴레이 회로에 대해 가속수명시험을 수행하여 수명 향상 여부를

확인하고자 하였다.

4.1 구동 유닛

구동 유닛의 고장 분석결과 유압전동기 압력스위치 누유현상에 의한 것으로 고장모드는 압력으로 확인되었고, 고장메커니즘은 다이어프램 손상으로 확인되었다. 따라서 다이어프램 손상 방지를 위해 강구한 개선방안의 효과성을 검증하기 위해 가속수명시험을 수행하였다.

유압전동기 압력스위치에 대한 가속수명시험 시험장치 구성은 Fig. 8과 같다. 압력을 인가할 수 있는 전원장치(Power Pack), 운용횟수를 제어하는 제어 프로그램, 압력스위치를 장착하는 매니폴더, 압력을 해제하는 솔레노이드 밸브(Solenoid Valve), 기타 유압호스 및 케이블로 구성되어 있다.

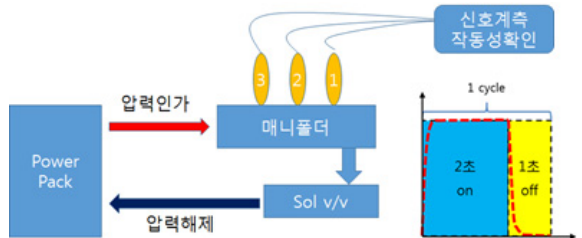
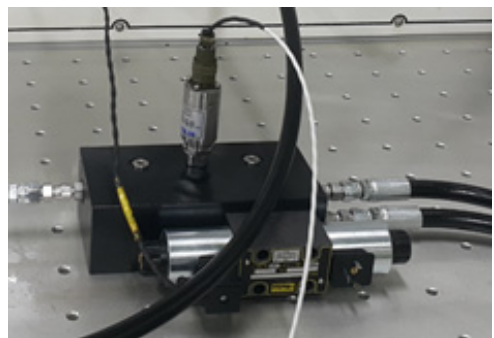


Fig. 8. The test configuration for the pressure switch

Table 4. The result of the accelerated life test for the hydraulic motor(Cycles)

시료	Case1 (3,600 psi)	Case2 (4,200 psi)	Case3 (4,500 psi)
1	15,902	7,106	7,314
2	36,200	8,904	8,367
3	39,328	13,596	17,490

유압전동기의 압력스위치 신호가 발생하지 않는 상태를 고장상태로 보았다. 가속인자는 압력으로 가속수준은 정상압력의 1.2, 1.4, 1.5배 수준인 3,600, 4,200, 4,500 psi를 인가하였다. 이에 대한 가속수명시험 결과는 각각의 시료 및 가속수준에 대한 운용횟수(Cycles) 값으로 Table 4에 나타내었다.

유압 전동기의 가속수명 데이터에 대한 수명분포를 추정된 결과 Anderson-Darling(AD) 값이 1.856으로 와이불(Weibull) 분포가 적합한 것으로 판단하였으며 각각의 수명분포 추정선이 서로 평행하게 나타나고 형상모수 β 값이 2.61586으로 동일하므로 가속성이 성립한다는 것을 알 수 있다. 가속수명과 가속인자의 관계를 나타내는 식은 가속인자가 비열 가속인자인 압력이므로 역승모형(Inverse Power Law Model)^[5]에 적합하며 식 (3)과 같다. 여기서 η 은 척도모수, L 은 수명특성, V 는 스트레스 수준, K 와 n 은 결정해야 할 관계식의 모수이다.

$$\eta_V = L(V) = \frac{1}{KV^n} \quad (3)$$

가속인자 수준(V)에서의 평균수명은 식 (4)와 같다.

$$MTBF_V = \frac{1}{KV^n} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (4)$$

그리고 역승 관계식에 의한 가속계수(Acceleration Factor)는 다음 식 (5)와 같다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{accelerated}} = \frac{\frac{1}{KV_{acc}^n}}{\frac{1}{KV_{use}^n}} = \left(\frac{V_{acc}}{V_{use}}\right)^n \quad (5)$$

또한 신뢰성 평가 척도인 B10 수명은 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$B_{10} = \eta \times [-\ln(1 - 0.1)]^{\frac{1}{\beta}} \quad (6)$$

Fig. 9에서 보이는 바와 같이 수명분포 분석한 결과 척도모수 η 는 72,241.1, 형상모수 β 는 2.61586로 산출되었고, K 는 8.74×10^{22} , n 은 4.6589이다. 이 값을 이용하여 유압전동기 사용조건(3,000 psi)에서의 MTBF와

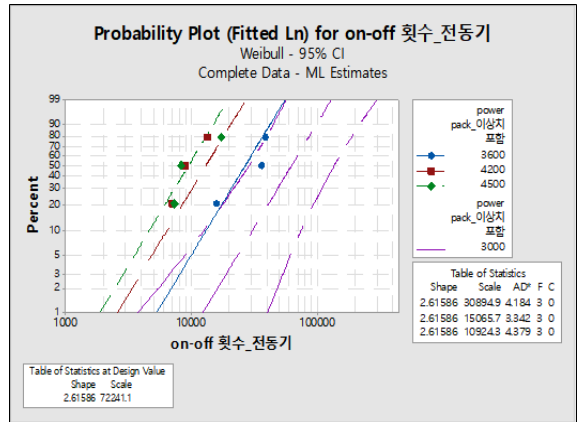


Fig. 9. Parameter(η , β) estimation for accelerated life data of the hydraulic motor

B_{10} 수명을 추정된 결과는 64,177 Cycles, 30,561 Cycles로 산출되었다. 각 가속조건에서의 가속계수는 $AF_{1.2} = 2.338$, $AF_{1.4} = 4.795$, $AF_{1.5} = 6.613$ 이다. 유압전동기의 MTBF와 B_{10} 수명의 단위를 식 (7)을 이용하여 시간으로 변경하면 25,671 hrs, 12,224 hrs가 된다.

$$\frac{\text{가속수명 결과 Cycles}}{1\text{일 운용 Cycles}/1\text{일 운용시간}} \quad (7)$$

개선 전(OT) 유압전동기의 MTBF(570.7 hrs) 대비 약 45배 향상된 것을 알 수 있다.

4.2 전투제어시스템

전투제어시스템에 대한 고장모드는 발사통제장치 내부 릴레이에서 발생하는 서지 전압이며, 고장메커니즘은 릴레이 소착으로 확인되었다. 이에 대한 개선방안이 적용된 제품의 개선효과를 검증하기 위하여 가속수명시험을 추진하였다.

발사통제장치의 릴레이 가속수명시험을 위한 회로 구성은 Fig. 10과 같다. 사격과 같은 실제 운용특성을 고려하여 온도 조건을 부여하였으며 릴레이 동작여부를 확인할 수 있도록 신호 계측용 레코더를 활용하였다. 또한, 여러 시험조건에서 확인하기 위해 부하용 가변저항을 연결하였다.

릴레이 접점이 소착되어 제 기능을 발휘하지 못하는 상태를 고장상태로 보았다. 가속인자는 릴레이 스위치에 흐르는 정격 전류의 2, 3, 4배 수준인 4, 6, 8 A를 가속수준으로 설정하였고, 작동온도는 모든 전류조건

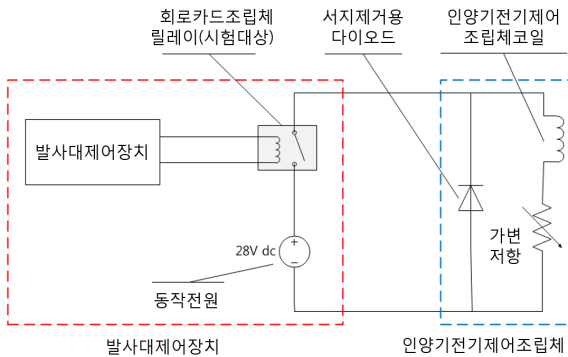


Fig. 10. The test configuration for the relay circuit

Table 5. The result of the accelerated life test for the fire control computer(Cycles)

시료	Case1 (4 A)	Case2 (6 A)	Case3 (8 A)
1	279,485	81,348	69,801
2	288,161	85,433	45,270
3	267,412	95,610	53,178

에서 110 °C의 온도를 가하여 시험을 수행하였다. 이에 대한 가속수명시험 결과는 Table 5에 나타내었다.

가속수명 데이터에 대한 수명분포를 추정한 결과, 와이블(Weibull) 분포가 적합한 것을 확인하였으며, Fig. 11과 같이 수명분포를 산출하였다. 데이터들이 직선에 가깝게 타점되어 있고 수명분포 추정선이 서로 평행하게 나타나는 것을 알 수 있다. 가속수명과 가속인자의 관계를 나타내는 식은 역승모형(Inverse Power

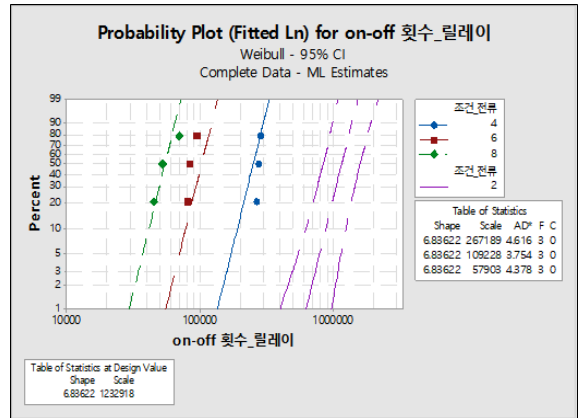


Fig. 11. Parameter(η , β) estimation for accelerated life data of the fire control computer

Law Model)을 적용하였다.

추정된 척도모수 η 은 1,232,918이며, 형상모수 β 는 6.83622이고, 추정 모수를 이용하여 발사통제장치의 사용조건(2 A)에서의 MTBF와 B_{10} 수명은 1,151,891 Cycles, 887,098 Cycles로 산출되었다. 마찬가지로 발사통제장치의 MTBF와 B_{10} 수명의 단위를 시간으로 변경하면 각각 7,679 hrs, 5,914 hrs가 된다. 발사통제장치의 개선 전 MTBF는 고장데이터 부족으로 OT와 FT 고장 데이터를 종합하여 추정하였으며 개선 전(OT, FT) 발사통제장치의 MTBF(687 hrs) 대비 약 11배 증가된 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 개발시험 단계 고장데이터 분석으로부터 체계와 주요 구성품의 신뢰도를 분석하였다. 신뢰도가 낮은 구동유닛과 발사통제장치를 설계개선 대상으로 선정하여 설계를 개선하고 가속수명시험을 활용하여 신뢰도 성장을 확인하였다.

우선적으로 구동유닛의 압력스위치 누유 문제에 대한 고장메커니즘 분석을 통하여 압력스위치에 인가되는 압력을 가속인자로 설정하고 가속수명시험을 수행하였다. 전투제어시스템에 대해서는 릴레이 소착 현상 해소를 위해 회로도에 릴레이를 추가하여 설계 개선하였고, 개선 후 수명을 평가하기 위해 릴레이 스위치에 흐르는 전류의 크기를 가속인자로 설정하여 수명을 평가하였다. 개선 후 신뢰도 개선 대상 두 품목

의 MTBF는 개선 전 대비 약 45배, 11배로서 신뢰도 성장이 충분함을 알 수 있었다.

개발 단계부터 양산운용 단계에 이르기까지 신뢰성 지표를 중심으로 예방적 품질관리 활동 강화가 중요하다. 개발과 양산운용 단계 사이에 핵심 품목에 대한 수명 검증 절차를 수행함으로써 양산운용 단계의 체계 신뢰도를 효과적으로 확보할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] C. H. Lee, Y. S. Ku, H. E. Hong, I. H. Jung, D. I. Park and 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, 2016.
- [2] J. Ko, S. K. Lee, S. Kwon, S. Noh, T. Chung, C. Park and M. Kim, "Reliability Growth Program," Journal of Applied Reliability, Vol. 6, No. 1, pp. 13-25, 2006.
- [3] Y. J. Lee, G. B. Bae, Y. M. Heo, J. H. Seo, S. B. Kim, J. K. Choi and W. J. Park, "Reliability Growth Management for Armed Vehicle : Launcher System Case Study," Journal of the Korean Society for Quality Management, Vol. 45, No. 4, pp. 981-994, 2017.
- [4] MIL-HDBK-189C, Reliability Growth Management, Department of Defense, 2011.
- [5] W. Nelson, "Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis," Wiley, New York, 1990.