

유도무기 시스템의 운용 신뢰도 분석

하 주 석* · 김 경 모**

요 약

유도무기체계는 어떤 장비보다도 신뢰성이 가장 중요시 된다. 그러나 제작비용이 고가여서 생산수량이 적고, 배치 후 운용 데이터 획득까지 장기간이 소요되어 주로 개발단계의 신뢰성 예측자료가 활용된다. 개발단계의 신뢰성 예측은 실제 운용환경을 모두 반영하는데 한계가 있어 실제 운용환경에서의 신뢰성 분석이 필요하였다. 본 연구에서는 국내개발 유도무기에 대한 실제 운용 데이터를 활용하여 수명분포를 추정하고, 최소제곱법과 최우추정법을 적용하여 신뢰도 값을 추정하였다. 또한, 개발단계에서 예측된 신뢰도 값과 실제 운용신뢰도 값을 비교하였다. 본 연구 결과로 볼 때 실제 유도무기의 신뢰도는 예측된 값보다 높게 나타났으며, 이는 최신 설계기술의 적용 및 향상된 부품의 신뢰도 값이 예측 데이터에 반영되지 못한 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 국내개발 유도무기에 대한 실제 운용 신뢰도를 확인할 수 있었으며, 향후 개발될 유도무기의 신뢰도 분석 연구 활동에 기여 할 것으로 기대된다.

Operational Reliability Analysis of Guided Weapon Systems

Ha Ju Seok* · Kim Kyung Mo**

ABSTRACT

Reliability is the priority matter in guided weapon systems. The reliability prediction data is used during the development stage as the manufacturing cost is very high and the production quantity is quite limited. At the same time it takes relatively a long period of time to acquire a reliable operation data set after deployment such that in order to determine the operational reliability, weapons must be tested and analyzed in real operating environments. For the research, the life distributions were estimated by using actual operation data and the reliability was calculated by applying the method of least squares and maximum likelihood estimation. Also, the comparisons were made between predicted reliability and actual operational reliability. As a result, the actual reliability of each system was higher than predicted reliability and it was considered that such a difference was caused by the fact that the application of the latest designing technology and improved parts to the guided weapon systems was not reflected on the estimation of predicted reliability. It was possible to confirm the actual operational reliability of domestic (ROK) guided weapon systems through this research and the methods used here will contribute to the reliability analyses for the future guided weapon systems to be developed.

Key words : Guided Weapon Systems, Operational Reliability, Reliability Prediction

접수일(2017년 9월 5일), 게재확정일(2017년 9월 25일)

* 금오공과대학교 산업공학과(제1저자)

** 금오공과대학교 산업공학과(교신저자)

1. 서 론

소비자가 제품을 사용함에 있어 품질의 척도는 제품의 신뢰도라 할 수 있을 것이다. 특히, 특수한 상황에서 사람의 생존과 관련된 제품이라면 신뢰도의 중요성은 더욱 크다고 할 것이다. 제품의 신뢰도를 평가하는 방법은 신뢰도 예측 방법과 신뢰성시험을 통한 신뢰도 확인 방법이 있으나, 제품의 제작비용이 과다하게 소요되거나 신뢰성 시험기간이 장기간 소요된다면 신뢰도 예측 방법이 유일한 대안이다. 군용 유도무기는 제품가격이 고가이고 고도의 신뢰성을 요구하는 제품으로 일반적인 신뢰성 확인시험으로 제품의 신뢰도를 확인하기에 많은 제한적 요소가 있다. 무기체계에 대한 신뢰도 예측의 일반적 방법론은 시스템 단위의 신뢰도 모델을 설정하고, 기계류 부품은 NPRD-95, 전기/전자부품은 MIL-HDBK-217을 참조하여 산출한다. 분석방법은 부품부하분석법(part stress analysis)를 적용하고 지수분포를 가정한다. 그러나, 문제는 이러한 예측방법이 시스템의 실질적인 운용상태를 얼마나 정확하게 반영하느냐에 있다. 핸드북에서 제시하는 신뢰도 예측방법이나 수명시험과 같은 연구실에서의 실험 등은 실제 사용환경에서의 운용환경을 모두 반영할 수 없다는 것이다. 따라서, 신뢰도 예측방법은 유도무기 개발시 설계의 완성도를 평가하는 하나의 방법은 될 수 있으나, 전력화 이후에는 운용환경 하에서의 고장 데이터 분석을 통해 제품의 신뢰도를 확인하고 개선을 통해 운용 신뢰도를 향상해 가야한다.

유도무기 시스템에 대한 신뢰성 분석관련 연구는 지속적으로 수행되고 있으며, 최근 국내 유도무기 개발을 통해 많은 연구가 수행되고 있다. 최인상 외 3명(2009)은 운용시스템과 일회성 시스템의 신뢰도 분석 방법론 비교를 통해 탄약 및 유도탄은 MTBF(Mean Time Between Failure)와 같이 시간으로 표현되는 것이 아니라 확률 값으로 표현되어야 하고 이에 대한 방법론을 제시하였다[1]. 이종문 외 2명(2011)은 OO무기체계에서 고장율을 산출하는 연구를 수행하였으며, 유도탄 신뢰도를 유지하기 위해서 예방점검 주기가 필요하다고 판단하여 적절한 예방점검 주기의 선정

방법을 제시하였다[2], 홍석진 외 1명(2016)은 OO유도탄 신뢰도 분석방안 및 활용방안으로 Probit분석을 실시하였으며, 실사격 데이터와 주기점검 데이터를 이용하여 저장년도에 따른 신뢰도를 제시하였다[3].

본 연구에서는 기존에 유도무기를 탄약과 같은 일회성 시스템으로 보고 임무 성공률(probability of success)로 신뢰도를 평가하지 않고 운용 시스템과 같이 MTBF로 신뢰성 척도를 사용하였다. 이는 최근에 개발된 유도무기는 탑재된 전자장치의 비중이 커지고 신뢰성 또한 전자장치의 신뢰성에 크게 의존하고 있기 때문이다. 그래서, 운용과정에서도 상시 점검을 수행하고 있어 일회성 시스템이라고만 볼 수 없기 때문이다. 본 연구의 대상 장비는 대함용 유도무기체계(체계A)와 대공용 유도무기체계(체계B)로 각기 다른 Platform 적용되고 있는 국내개발 유도무기의 필드 데이터를 통해 신뢰도를 분석하였다.

2. 필드 데이터의 수집 및 분석

2.1 개요

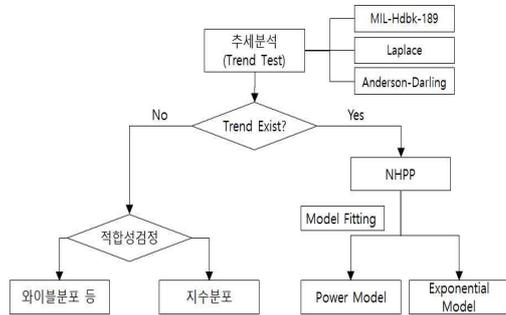
2.1.1 데이터의 수집

데이터의 수집은 함상에서 운용되는 대함유도무기 시스템(체계A)과 육상에서 대공방어용으로 운용되는 유도무기시스템(체계B) 2종류의 유도무기시스템에 대해서 수집하였다. 필드 데이터는 초도양산 납품이후 최근까지의 필드 데이터를 대상으로 수집하였으며, 수집범위는 장비의 우발불량으로 하부품목 교체(부품, 회로카드조립체 등)를 통하여 대상품목이 복구된 것으로 하였고, 사용자 부주의나 설계개선 사항의 소급적용 등은 제외하였다.

2.1.2 수리가능 시스템의 필드 데이터 분석 절차

구성품의 교체나 조정 등을 통하여 요구되는 성능으로 재 작동하게 되는 시스템을 수리가능 시스템(repairable system)이라 한다. 수리가능 시스템의 필드 데이터 분석절차는 (그림1)과 같다.

- ① 추세분석: 수리실적이 있는 체계를 대상으로 추세분석을 실시한다.
 - MINITAB이 제공하는 3가지 검정방법 MIL-HDB K-189, Laplace, Anderson-Darling검증을 기준으로 추세 유무를 판정하였다.
- ② 추세분석 결과 고장간 시간에 추세가 있으면 NHP P(Non Homogeneous Poisson Process)모델을 적용하였다.
- ③ 추세분석 결과 고장간 시간에 추세가 없으면 분포의 적합성 검정을 통하여 와이블 또는 지수분포를 이용한 분포분석을 수행하였다.



(그림 1) 수리가능 시스템의 필드 데이터 분석절차

2.2 체계A 필드 데이터 분석

2.2.1 필드 데이터

체계A의 필드 데이터는 <표 1>과 같다. 필드 데이터는 일부 데이터만 나타내었다.

<표 1> 체계 A 필드 데이터

S/N	운용시간	TBF	censoring
0001	480	480	0
0002	12,936	12,936	1
⋮	⋮	⋮	⋮

2.2.1.1 가정

체계 A의 경우, 유도탄 체계 정비업무를 고객이 수행함에 따라 고장실적을 마지막으로 입수한 시점으로

관측 중단 시점으로 적용하였다.

- A체계 운용개념으로부터 연간 운용시간은 8,760 (365일) 이다.
- 동일 발생년월에 발생한 중복고장은 단일고장으로 가정한다.
- 분석일 이후에 납품된 체계는 분석에서 제외하였다.
- 서비스 이력 중 조정시험만 수행한 것도 분석에 포함하였다.

2.2.1.2 필드 데이터 가공

데이터 분석을 위해 필드 데이터를 다음과 같이 가공하였다.

- 발생년월(접수일)은 실사격 유도탄의 경우 실사격 일자, 고장이 발생한 경우 고장발생일, 고장이 발생하지 않은 미사격 유도탄의 경우 분석기준일이 된다.
- 운용일 = (발생년월) - (납품년월)
- 운용시간 = (운용일)×24
- TBF(Time Between Failures) : 고장간 시간
- Censoring : 고장=1, 관측중단=0

2.2.2 필드 데이터 분석

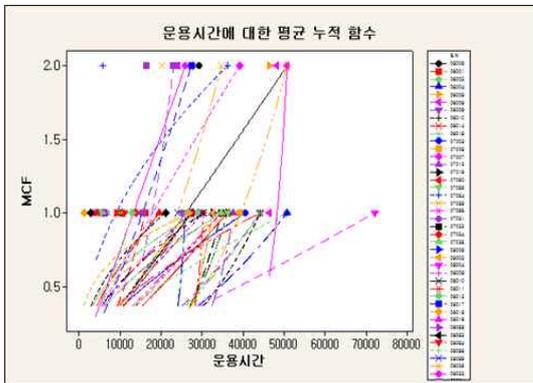
2.2.2.1 추세분석

수리 실적이 있는 체계를 대상으로 추세분석을 실시하였다. MINITAB에서 제공하는 3가지 검정방법 MIL-Hdbk-189, Laplace, Anderson-Darling 검정을 기준으로 추세 유무를 판정하였으며, 유의수준은 10%를 적용하였다. 운용시간에 대한 사건그림 및 평균누적함수는 (그림 2)와 같고, 추세분석 결과는 다음과 같다.

- 납품 체계 = 000대 (수리실적이 1건 이상 = 00대 무고장 = 000대)
- 유의수준 10%로 추세가 있는 체계 = 3
- 체계 A의 경우 고장간 추세가 없다고 판정하였다.



(a) 운용시간에 대한 사건 그림



(b) 운용시간에 대한 평균누적함수

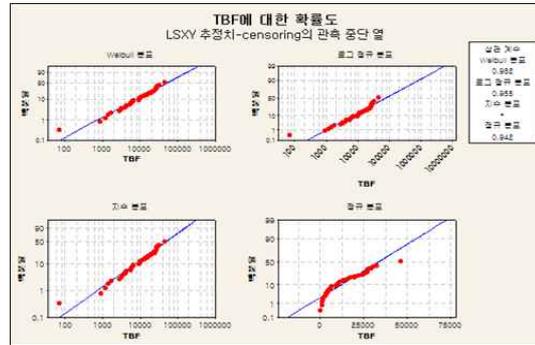
(그림 2) 운용시간에 대한 사건그림 및 평균 누적함수 (체계 A)

2.2.2.2 수명분포 가정

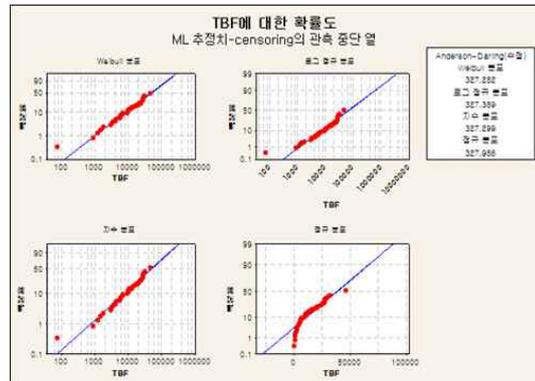
MINITAB의 분포 ID 그림을 이용하여 고장간 시간(TBF)에 적합한 수명분포를 선정하였다. 추정방법으로 최소제곱법을 적용한 경우 상관계수가 클수록, 최우추정법을 적용한 경우 Anderson-Darling 통계량 값이 작을수록 분포의 적합성이 높다고 할 수 있다. 따라서 <표 2>로 부터 체계 A 고장간 시간(TBF)에 적합한 수명분포로 와이블 분포를 가정하였다. 최소제곱법과 최우추정법을 각각 적용한 분포 ID 그림은 (그림 3)과 같다.

<표 2> 체계 A 고장간 시간(TBF) 분포 적합도

추정	분포	와이블	로그정규	지수	정규
최소제곱법 (상관계수)		0.982	0.955	*	0.942
최우추정법 (AD)		327	327	327	329



(a) 최소제곱법



(b) 최우추정법

(그림 3) 분포 ID 그림(체계 A)

2.2.2.3 수명분포 추정

체계 A 고장간 시간(TBF)이 와이블분포를 따른다고 가정하고, MINITAB의 모수분포분석을 이용하여 수명분포의 형상모수와 척도모수를 추정하였다. 최우추정법과 최소제곱법을 이용하여 와이블분포의 형상모수와 척도모수에 대한 점추정치와 95% 신뢰구

간을 추정한 결과는 <표 3>과 같다. 한편, <표 3>에서 와이블 분포의 형상모수에 대한 95% 신뢰구간이 1을 포함하고 있다. 따라서 가설 $\beta=1$ vs. $H_1: \beta > 1$ 에 대하여 유의수준 5%로 H_0 를 기각할 수 없다. 와이블분포에서 형상모수가 1이면, 지수분포가 되므로 체계 A 고장간 시간(TBF)는 지수분포를 따른다고 할 수 있다. 체계 A 고장간 시간(TBF)이 지수분포를 따른다고 다시 가정하고 지수분포의 평균을 추정하였다. 지수분포의 평균수명에 대한 점추정치와 95% 신뢰구간을 추정한 결과는 <표 4>와 같다.

<표 3> 체계 A 고장간 시간(TBF) 와이블 분포 모수 추정

추정	모수	추정치	표준오차	95.0% 정규 CI	
				하한	상한
최우 추정법	형상	1.09888	0.129844	0.871708	1.38525
	척도	67666.0	11598.6	48357.9	94683.5
최소 제곱법	형상	0.989651	0.133941	0.759064	1.29028
	척도	79422.3	17421.9	51668.4	122084

<표 4> 체계 A 고장간 시간(TBF) 지수분포 모수 추정

추정	모수	추정치	표준오차	95.0% 정규 CI	
				하한	상한
최우 추정법	평균수명 (MTBF)	74821.8	10182.0	57305.2	97692.6
최소 제곱법	평균수명 (MTBF)	70863.8	9384.81	54663.3	91865.6

2.3 체계 B 필드 데이터 분석

2.3.1 필드 데이터

체계 B의 필드 데이터는 <표 5>와 같다. 필드 데이터는 일부 데이터만 나타내었다.

<표 5> 체계 B 필드 데이터

S/N	운용 시간	조정운용 시간	TBF	ensor-ing
001	336	336	336	0
002	6,240	6,240	6,240	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

2.3.1.1 가정

체계 B의 경우 필드에서 유도탄이 저장된 상태에서 4년주기로 점검하여 이상유무를 확인하는 장비임에 따라 아래와 같이 가정하였다.

- 체계 B 운용개념으로부터 연간 운용시간은 8,760(365일) 이다.

- 동일 발생년월에 발생한 중복고장은 단일고장으로 가정한다.

- 실사격 유도탄 중 명중 또는 불명중은 정상, 미발사는 고장으로 판정하였다.

- 미사격 유도탄의 경우, 4년 미만의 데이터는 분석에서 제외하고, 4년~8년 데이터는 4년(1460*24=35040 시간)에서 관측중단, 8년~12년 데이터는 8년(2920*24=35040 시간)에서 관측중단된 것으로 처리하였다.

2.3.1.2 필드데이터 가공

데이터 분석을 위해 필드데이터를 다음과 같이 가공하였다.

- 발생년월(접수일)은 실사격 유도탄의 경우 실사격 일자, 미사격 유도탄의 경우 분석 기준일로 하였다.

- 운용일 = (발생년월) - (납품년월)

- 운용시간 = (운용일)×24

- 조정운용시간 :

① 실사격의 경우 : 조정 운용시간 = 운용시간

② 미사격의 경우

* 4년 미만 데이터 : 분석에서 제외

* 4년~8년 데이터 : 4년(1,460*24=35,040시간)에서 관측중단

* 8년~12년 데이터 : 8년(2,920*24=35,040시간)에서 관측중단

- TBF(Time Between Failures) : 고장간 시간
- Censoring : 고장=1, 관측중단=0

2.3.2 필드 데이터 분석

2.3.2.1 추세분석

반복수리 실적이 있는 체계가 없어 추세분석을 실시하지 않았다.

2.3.2.2 수명분포 가정

MINITAB의 분포 ID 그림을 이용하여 고장간 시간(TBF)에 적합한 수명분포를 선정하였다. 추정방법으로 최소제곱법을 적용한 경우 상관관계수가 클수록, 최우추정법을 적용한 경우 Anderson-Darling 통계량 값이 작을수록 분포의 적합성이 높다고 할 수 있다. 체계 B의 경우 납품수량(0,000대) 대비 고장 데이터의 수(12)가 매우 작아 고장간 시간(TBF)에 적합한 수명분포로 지수분포를 가정하였다.

2.3.2.3 수명분포 추정

체계 B 고장간 시간(TBF)이 지수분포를 따른다고 가정하고, MINITAB의 모수분포분석을 이용하여 수명분포의 평균수명을 추정하였다. 고장간 시간(TBF)에 대한 관측중단 정보는 다음과 같다.

- 관측 중단되지 않은 값 : 0,000대
- 구간 관측 중단 값 : 00대

최우추정법과 최소제곱법을 이용하여 지수분포의 평균에 대한 점추정치와 95% 신뢰구간을 추정한 결과는 <표 6>과 같다.

<표 6> 체계 B 고장간 시간(TBF) 지수분포 모수 추정

추정	모수	추정치	표준오차	95.0% 정규 CI	
				하한	상한
최우추정법	평균수명(MTBF)	7,382,078	2,131,026	4,192,349	12,998,696
최소제곱법	평균수명(MTBF)	815,599	78,261.7	675,770	984,361

3. 결 론

필드 데이터를 이용하여 유도무기체계의 운용 신뢰도를 분석한 결과 체계A는 고장 데이터를 통해 수명분포 추정결과 수명분포는 개발시에 예측한 지수분포로 나타났으며, 체계B는 운용수량에 비해 고장 데이터가 충분하지 않아 개발시 예측한 지수분포를 반영하여 신뢰도를 추정하였다. 신뢰도 추정결과는 두체계 모두 개발시에 예측된 신뢰도 보다 높게 나타났으며, 특히 저장상태 운용하는 유도무기인 체계B의 신뢰도는 개발시 보다 현저히 높게 나타났다. 이는 예측방법이 MIL-HDBK-217을 기준으로 하여 유도탄이 운용 가능한 최악의 운용환경 반영하여 예측을 하고 있으나 실제 운용환경은 국내환경으로 다소 차이가 발생하며, 제품에 적용된 최신 부품의 신뢰도가 아직 반영되지 않음에 따른 차이가 있는 것으로 판단된다. 또한, 국내 유도무기시스템의 개발/운용기간이 짧음에 따라 필드에서의 고장데이터가 부족하여 신뢰도 예측에 충분히 반영되지 못하기 때문이다.

국내 유도무기 시스템의 신뢰도 향상을 위해서는 필드에서 발생하는 고장데이터를 체계적으로 수집하고 분석할 수 있는 체계구축이 시급한 실정이며, 축적된 데이터 분석을 통한 신뢰도 개선활동이 지속적으로 추진되어야 할 것이다. 또한 유사 유도무기 체계개발의 신뢰성 예측 연구에 본 연구에서 획득된 실제 운용신뢰도가 반영되어야 할 것이다. 유도무기 체계는 시스템이 방대하여 본 연구에서는 체계단위에서의 운용 신뢰성 분석으로 제한되었다. 유도무기 체계에 대한 신뢰성 추정의 향상을 위해서는 체계적

검에서 제한적으로 수행되고 있는 One-shot부품에 대한 신뢰성 분석이 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Choi I.S., Cheon L.M., Baek L.M., Son Y.G., "Comparison Study of Operating System and One-shot System for Reliability Analysis Methodology", Spring Conference of the Korea Management Engineers Society, pp. 981-985, 2009.
- [2] Lee J.M., Kwon H.M., Lee H.P., "A study on preventive maintenance of Missile and life cycle plans", Korean institute of Industrial Engineers, pp. 1171-1176, 2011.
- [3] Hong S.J., Jung S.H., "A Study of Reliability of Guided Missile(OO) Using Probit Analysis", Journal of the Korea Society For Quality Management, Vol.44, No. 3, pp. 553-564, 2016.
- [4] Jun I.H., "Study on the Reliability Improvement of weapon system using field data", Journal of the Korea Society For Quality Management, Vol. 4, No. 3, pp. 159-160, 2012.
- [5] Kim I.S., Jung W., "Comparison of RAM Target Value and Operation Data in Air Weapon Systems", Journal of Applied Reliability, Vol.15, No. 4, pp. 282-288, 2015.
- [6] Kim K.T., "The developing direction of Defence reliability policy & system", Journal of Applied Reliability, Vol. 7, No. 3, pp. 101-110, 2007.
- [7] Daniel J., Owen Holbrook R., "Effects Environment and Aging upon Missile Reliability", IEEE Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 314-316, 1998.
- [8] Moon B.M., Seon E.J., Bae S.J., "Bayesian reliability Estimation for one shot devices of small size", Journal of Applied Reliability, Vol. 13, No. 2, pp. 99-107, 2013.
- [9] Bierbaum R.I., "Reliability Assessment Methodology for 1-shot Systems", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 536-541, 2002.
- [10] Lee Y.U., "A Study on the RAM Analysis of Effective Integrated Logistics Support(ILS)", Journal of Convergence Security, Vol. 16, No. 6, pp. 67-74, 2016.
- [11] Kim H.C., Kim K.S., "The Comparative Software Reliability Model of Fault Detection Rate Based on S-shaped Model", Journal of Convergence Security, Vol. 13, No. 1, pp. 3-10, 2013.

[저자소개]



하 주 석 (Ju-Seok Ha)
 1996년 2월 인제대학교
 전자공학과 학사
 2001년 8월 금오공과대학교
 산업공학과 석사
 2011년 ~ 현재 금오공과대학교
 산업공학과 박사과정
 email : tin0801@naver.com



김 경 모 (Kyung-Mo Kim)
 1990년 8월 한국과학기술원 박사
 1985년 ~ 1990년 경상대학교
 산업공학과 교수
 1990년 ~ 현재 금오공과대학교
 산업공학과 교수
 email : kmkim@kumoh.ac.kr