

방산분야에서 수리순환부품이 신품과 동등한 품질 수준임에 대한 검증방안 연구

이기림^{1*}, 이상민¹, 정원용²

¹국방기술품질원 지휘정찰센터, ²한화시스템 품질경영센터

A study on the method of proving that repaired parts are of the same quality level as new ones in defense industry

Gi-Rim Lee^{1*}, Sang-Min Lee¹, Won-Yong Jeong²

¹C4ISR Center, Defense Agency for Technology and Quality

²QM Center, Hanwha Systems

요약 본 논문에서는 전력화된 무기체계에서 고장이 발생하였을 경우, 무기체계 수리로 인한 전력화 공백 기간을 단축하기 위해 적용하는 수리순환부품이 신품과 동등한 품질임을 검증하는 방안을 제안한다. 수리된 부품의 모집단 크기가 충분히 많은 경우, 고장 데이터를 바탕으로 하여 해당 부품의 육조 곡선 구간을 추정하고 수리된 부품이 사용된 시간과 DFR(Decreasing Failure Rate)을 비교하여 수리된 부품이 신품과 동등한 품질임을 검증하는 방안을 제시하였다. 또한, 모집단의 크기가 제한되는 경우에는 MTBF(Mean Time Between Failure)와 수리된 부품이 사용된 시간을 바탕으로 신품과 동등한 수준의 품질임을 검증하는 방안을 제안한다. 본 연구에서 제시된 방안을 통해 수리된 부품이 수명 측면으로 신품과 동등한 품질임을 합리적으로 증명할 수 있으며, 관련 규정에 따라 향후 납품될 무기체계에 적용할 수 있을 것이다.

Abstract This study proposed a method to verify that repair-circulation parts applied to shorten the combat power blank due to a repair weapon system are of equivalent quality to new ones. In case the population of repaired parts is sufficiently large, a verification method was proposed by inferring the bathtub curve (Shape parameter of Weibull distribution) using the failure data and comparing DFR (Decreasing Failure Rate) and usage time as a method to prove that they are of equal quality in terms of lifespan. On the other hand, when the size of the population of repaired parts is limited, a verification method through a comparison of the MTBF and usage time was proposed to prove that the quality is equivalent in terms of lifespan. Verification through the proposed method can reasonably prove that the repaired parts are of the same quality as the new ones, and the repaired parts can be applied to the weapon system to be delivered in the future according to the relevant regulation.

Keywords : Weibull Distribution, Shape Parameter, Bathtub Curve, Repair-Circulation Part, MTBF

1. 서론

오늘날까지 대한민국의 방위산업과 방산기술 그리고 무기체계는 눈부신 발전을 거듭해왔다. 그럼에도 대부분

의 무기체계는 완전한 국산화가 이루어지지 않고 주요 구성품들의 해외도입품목의 비중이 여전히 존재하는 상황이다.

해외도입품목은 국내 생산품목 대비 도입단가가 높으

*Corresponding Author : Gi-Rim Lee(DTAQ)

email: grlee@dtaq.re.kr

Received April 20, 2023

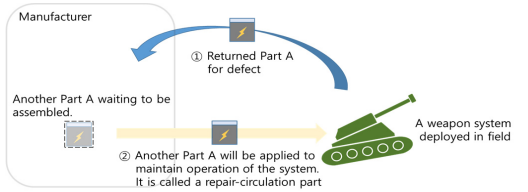
Accepted June 2, 2023

Revised May 18, 2023

Published June 30, 2023

며, 구매 또는 수리 납기가 짧게는 수개월에서 길게는 1년 이상으로 오랜 기간이 소요된다. 따라서 운용 중인 무기체계는 국내 생산품목의 고장이 발생하였을 경우보다 해외도입품목의 고장이 발생하였을 때 전력 공백에 대한 우려가 더욱 고조된다. 전력화되어 운용 중인 무기체계에서 해외도입품목의 고장이 발생하였을 경우, 사후봉사(A/S)를 위해 고장 발생품을 회수하고 해외 원제작사로 송환하여 수리하는 절차를 거치게 되면 해당 무기체계에 대한 장기간의 전력 공백을 피할 수 없는 것이 현실이다.

이러한 상황에서 방산업체는 Fig. 1과 같이 차후 납품할 무기체계에 사용되는 부품(이하 수리순환부품(修利循環部品))을 사후봉사에 활용하고, 무기체계에서 탈거된 고장 발생품을 수리하여 차후 납품할 무기체계에 적용하는 방안을 고려할 수 있다.



※ Returned Part A will be fixed by original manufacturer and applied to next weapon system.

Fig. 1. Application of Repair-circulation part

그러나 고장 발생품을 수리하여 차후 납품할 무기체계에 적용하여 납품하는 경우, 일각에서는 ‘중고품을 사용하여 납품한 것이 아닌가.’ 하는 의문이 생기기도 한다. 2012년에 K9 자주포를 생산하는 방산업체는 소요군의 전력 공백을 줄이기 위하여 전력화 장비에 수리순환부품을 적용 및 수리된 고장 발생품을 양산단계에 사용하여 중고품 사용 논란이 발생한 사례가 있다.

방위사업청은 해당 사례와 관련한 정책개선의 일환으로 방위사업관리규정에 수리순환부품의 적용과 수리순환부품 적용 이후 고장 부품이 수리된 후 차후 납품할 계약 품목(무기체계)에 적용할 수 있는 절차를 규정화하였다. 해당 규정은 개정을 거쳐 현재 ‘방위사업 품질관리규정’ 제79조 하자처리에 기술되어 있다[1].

해당 규정에 따르면 무기체계를 운용 중인 소요군은 무기체계의 불가동을 최소화하기 위하여 필요한 경우, 차후 납품할 계약 물품(무기체계)에 사용되는 부품(수리순환부품)을 우선적으로 요청할 수 있으며, 계약상대자(방산업체)는 차후 납품할 계약 물품(무기체계)에 지체가 발생하지 않는 범위 내에서 이를 제공할 수 있다. 수리순환부품 제공 이후 방산업체는 소요군으로부터 반납받은

부품을 양산계약에 재사용할 수 있도록 신품과 동등한 품질과 성능이 보증되도록 조치하여야 하며, 품질보증기관은 계약상대자(방산업체)가 ‘수리한 부품이 신품과 동등한 수준의 품질임’을 검증하여야 한다. 수리된 부품의 검증이 완료되면 추후 납품할 계약 물품에 적용이 가능하다. 이러한 규정은 고장 부품을 수리 및 원복하는데 장기간이 소요되는 경우, 소요군의 전력 공백을 방지하는 방안을 제시하며, 방산업체 입장에서 추가적인 부품구매에 따른 불용재고(不用在庫)를 줄여주므로 소요군과 방산업체 모두에게 합리적인 규정으로 판단된다.

다만 수리순환부품 적용 후 수리된 부품이 신품과 동등한 품질임을 검증하는 방안 등은 규정화되어 있지 않으므로 방산업체 및 품질보증기관은 이를 검증하는 방법에 대한 고안이 필요하다. 방위산업의 특성상 방산제품 및 부품 등은 양산단계로 이관되기 전 규격화 단계를 거치므로 그들의 형상(形狀) 및 성능(性能)이 명시되어 있는 국방 규격이 제정되어 있다. 따라서 수리된 부품의 성능의 경우 정의된 국방 규격에 따라 입증이 가능하나, 제품의 수명 측면에서는 수리된 구성품이 신품과 동등한 품질이라고 판단하기 어렵다.

따라서 본 연구는 수리순환부품의 적용 이후 수리된 부품을 양산단계에 사용하는 전제조건인 ‘수리된 부품이 신품과 동등한 품질임을 검증하는 방안’을 제시하고자 한다. 앞서 언급한 바와 같이 성능 검증 방안은 기존에 규격화된 기술자료로 인해 판단에 어려움이 없으므로 연구범위에서는 제외하였으며, 수리된 부품의 수명, 즉 신뢰성 관점에서 신품과 동등한 품질임을 검증하는 방안을 연구하였다.

2. 본론

2.1 고장 데이터가 확보된 부품의 검증 방안

수리 가능한 체계의 고장 강도 모형은 체계의 신뢰도 추정 및 예측 등 다양한 신뢰성 분석에 사용되기 때문에 체계에 적합한 고장 강도 모형을 사용하는 것이 중요하다[2]. 따라서 수리된 부품을 신뢰성(수명) 관점에서 신품과 동등한 품질임을 입증하기 위해서 우선 제품의 사용 시간에 따라 고장 발생률을 나타내는 욱조 곡선(Bathtub Curve)에 대하여 고찰하였다. 욱조 곡선은 와이블 분포를 활용하여 시간 흐름에 따라 고장률을 나타내는 대표적인 형태로서 충분한 고장 데이터 확보된 상황에서 해당 제품의 수명 등을 예측하는 데 사용된다.

와이블 분포의 확률밀도함수는 Eq. (1)로 정의되며, 와이블 분포의 hazard 함수는 Eq. (2)와 같다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-r}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-r}{\alpha} \right)^\beta} \quad (1)$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-r}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad (2)$$

- α : 척도 모수(Scale parameter)
- β : 형상 모수(Shape parameter)
- γ : 위치 모수(Position parameter)

그리고 형상 모수 β 에 따른 와이블 분포의 확률 밀도 함수는 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다.

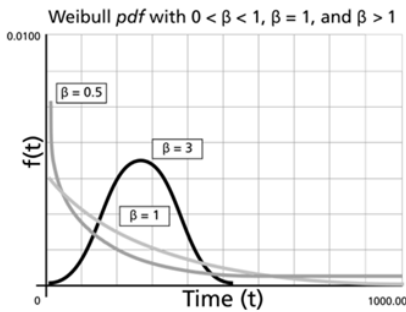


Fig. 2. Probability density function by β value.

일반적으로 고장률 함수의 분포에는 감소형 고장률(DFR, Decreasing Failure Rate), 상수형 고장률(CFR, Constant Failure Rate), 증가형 고장률(IFR, Increasing Failure Rate)의 3가지 형태가 있다. 따라서 고장률 함수의 분포에 따라 적절하게 표현할 수 있도록 만든 확률 분포가 와이블 분포이다[3].

욕조곡선은 구간별 고장 형태에 따라 Fig. 3과 같이 초기 고장인 DFR형태, 우발 고장인 CFR형태, 마모 고장인 IFR 형태로 구분되며 Table 1과 같이 구간별로 형상 모수 β 의 값이 상이하다.

Table 1. β -value by period.

Period	β -value
DFR	$\beta < 1$
CFR	$\beta = 1$
IFR	$\beta > 1$

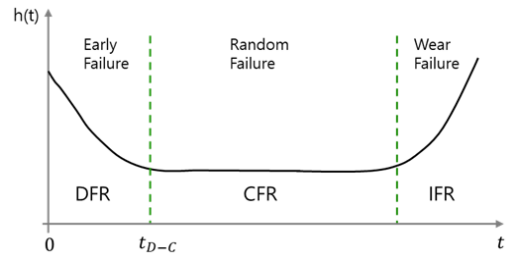


Fig. 3. Bathtub Curve

또한, 와이블 분포의 누적확률 밀도함수인 아래 Eq. (3)과 제품의 고장 데이터를 활용하여 척도 모수(α) 및 형상 모수(β)의 추정이 가능하며, 이를 통해 DFR의 종료 시점($\beta = 1$)과 CFR의 종료 시점($\beta > 1$) 역시 추정할 수 있다[4].

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-r}{\alpha} \right)^\beta} \quad (3)$$

통계적 추론으로 획득한 데이터의 모집단은 특정 분포를 따르므로, 수리된 부품의 모집단의 크기가 충분히 큰 경우에는 고장 데이터를 활용한 욕조 곡선의 추정이 가능하다[5]. 따라서 수리된 제품이 탈거되기 전까지의 실제 가동시간과 고장 데이터로 추론된 DFR의 종료 시점을 활용하여 수명 관점에서 신품과 동등한 성능임을 검증하는 방안을 제시하고자 한다.

방산 업체는 생산된 무기체계 운용 초기에 발생하는 고장을 예방하고자 ‘초기고장배제(ESS, Environmental Stress Screening)’ 공정을 적용하고 있다[6]. 초기고장배제 시험은 인위적으로 환경적 스트레스(Environmental Stress)를 제품에 인가하여 제품 생산 간 유입되는 잠재 결함을 제거하기 위한 공정이다. 이는 무기체계의 욕조 곡선에서 DFR의 구간을 줄이는 효과를 가져온다. ESS는 무기체계 전체 수명에서 IFR 시점을 조기 도래한다는 점에서 일정 부분 영향을 줌에도 초기 고장을 줄이는 것이 소요군 전력 공백의 예방에 더욱 효과적이기 때문에 공정단계에서 필수적으로 적용되며 합·부에 대한 판정을 수행하지 않는다.

즉, 방산업체는 소요군의 전력화 공백을 방지하기 위하여 유효한 수명인 CFR에 영향을 주지 않는 범위에서 ESS 공정을 적용하여 납품 이후부터 CFR 시점까지인 IFR 구간을 줄이려는 노력을 수행하고 있다.

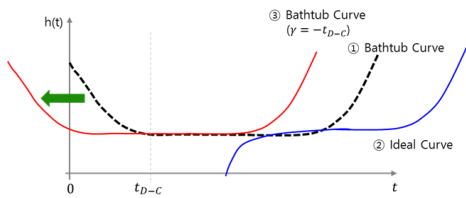


Fig. 4. Bathhtub Curve($\gamma = -t_{D-C}$)

이러한 관점에서 바라볼 때, 수리된 부품의 사용시간이 실제 고장 데이터로 식별된 IFR 구간 이내라면, 부품이 사용된 시간이 제품의 수명에 악영향을 주기보다는 ESS 공정을 통한 고위험구간인 DFR을 줄인 것으로 판단할 수 있다.

따라서 수리된 부품의 모집단의 크기가 크며, 고장의 데이터가 확보된 제품에 대하여 수명 관점에서 신품과 동등함을 검증해야 하는 상황에서는, 고장 데이터를 통해 DFR의 구간을 정의하고 해당 제품의 사용시간이 DFR 이내일 경우 신품과 동등한 품질임으로 판단하는 것이 타당할 것이다.

2.2 고장 데이터가 제한된 제품의 검증방안

앞서 제품의 고장 데이터를 바탕으로 육조 곡선의 DFR을 정의, 신품과 동등한 품질임을 검증하는 방법을 제시하였다. 이러한 방법은 통계적인 분석이 가능한 수준으로 수리된 부품의 모집단이 큰 경우 활용이 가능하다. 하지만 다품종 소량생산인 방산업계의 특성상 무기체계는 생산 및 납품되는 수량이 적기 때문에 모집단의 크기가 통계적 분석을 활용하기에 제한되는 경우가 많다. 따라서 모집단의 크기가 작으며 수집되는 고장 데이터가 제한되는 상황에서 수리된 부품이 신품과 동등한 품질임을 검증하는 방법의 고안 역시 필요하다.

따라서 수리된 부품 모집단의 크기가 작은 경우, 해당 제품(부품)의 MTBF(Mean Time Between Failure)와 고장 전까지 사용된 시간을 분석하여 신품과 동등한 품질임을 검증하는 방안 및 기준을 제시하고자 한다.

대부분의 무기체계는 국방규격의 요구사항으로 인해 해당 무기체계에 대한 신뢰도 분석이 수행된다. 무기체계에 대한 신뢰도 예측의 일반적 방법론은 시스템 단위의 신뢰도 모델을 설정하고, 기계류 부품은 NPRD-95, 전기/전자 부품은 MIL-HDBK-217을 참조하여 산출한다. 분석 방법은 부품 부하 분석법(Part stress analysis)을 적용하고 지수분포를 가정한다[7].

무기체계 대부분의 부품 단위 구성품은 개발단계에서

MTBF가 분석된다. 따라서 소요군이 운용하는 무기체계에서 수리된 부품에 대한 MTBF의 정보는 확보되어 있다. 또한, ESS는 여러 설계 가이드에 따라 ESS의 수행에 따른 수명 소모(Life Consumption)가 5% 미만인 되도록 설계된다[8].

또한, MTBF는 평균 고장 발생 기간으로 일반적으로 수리 가능한 제품 및 부품의 발생도 계산이나 교체 주기에 활용된다[9]. 무기체계의 경우 부품단위 단품을 제외한 대부분의 장비 및 구성품에 수리개념을 적용하고 있으며, 무기체계 신뢰도 예측 시 통상적으로 MTBF를 척도로 하고 있다[10].

따라서 ESS가 초기고장배제를 위하여 공정과정에서 적용된다는 점과 ESS에 의한 수명 소모(5% 미만)를 고려할 때, 수리된 부품의 사용시간이 MTBF대비 5% 미만이라면 해당 제품(부품)이 신품과 동등한 품질임으로 판단하는 데 무리가 없을 것이다.

신품과 동등한 품질임에 대한 사용시간의 판단 기준이 제품의 수명이 아닌 MTBF를 대비하여 선정하였기 때문에 이는 매우 보수적으로 결정된 기준임을 알 수 있다.

충분한 고장 데이터가 확보되지 않은 경우, DFR의 구간을 추론하는 또 다른 방법으로는 Fig. 5와 같이 비모수적 통계기법인 ‘Kaplan-Meier 생존 분석’을 활용하여 생존 곡선(survival curve)을 산출, DFR을 정의하는 방법이 있다.

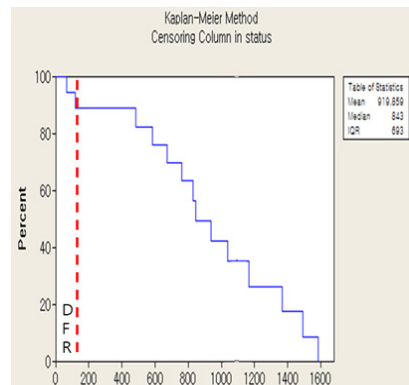


Fig. 5. Survival Curve by Kaplan-Meier Analysis

이러한 방법으로 결정된 DFR을 수명과 관련하여 신품과 동등한 품질임을 판단하는 데 사용하는 것은 신뢰하기 어려우므로, 본 연구에서는 해당 방법을 배제하였다.

3. 결론

본 논문은 전력화된 무기체계의 고장 발생 시, 수리순환부품의 적용 이후 수리된 부품이 신품과 동등한 품질임을 검증하는 방안에 대한 연구를 수행하였다.

수리된 부품의 모집단의 크기가 충분한 경우 고장 데이터를 바탕으로 해당 부품의 육조 곡선 구간을 추정할 수 있고, 수리된 부품의 사용 기간을 식별하여, 해당 기간이 DFR 이내라면 수명 관점에서 신품과 동등한 품질임으로 판정한다. 이는 무기체계에 적용되는 ESS 공정이 DFR의 구간을 줄여, 소요군 입장에서 더욱 신뢰성 높은 무기체계 운용을 제공하는 것을 근거로 한다.

다만, 소량생산된 무기체계에 적용되는 수리된 부품의 경우 모집단의 크기가 제한되어 동일한 방법으로 검증을 수행할 수 없다는 한계를 가진다. 따라서, 무기체계 개발 단계에서 분석된 신뢰성(MTBF)의 정보와 수리된 부품의 사용시간을 바탕으로 수리된 부품이 신품과 동등한 수준임을 판단하는 기준을 Table 2와 같이 제시하였다.

Table 2. method of proving repaired parts are of the same quality level as new ones.

Case 1. Population of repaired part is large enough.	
Method	Estimate the bathtub curve(End time of DFR Period) of the repaired part through failure data.
Criteria	$t_{usage} < \text{Termination time of DFR}$ ☞ If usage time of repaired part(t_{usage}) is within the DFR, repaired part is judged to be of the same quality level as new ones in terms of lifespan.
Case 2. Population of repaired part is limited.	
Method	Compare usage time of repaired part and 5% of MTBF.
Criteria	$t_{usage} < 5\% \text{ of MTBF}$ ☞ If usage time of repaired part(t_{usage}) is less than 5% of MTBF, repaired part is judged to be of the same quality level as new ones in terms of lifespan.

위와 같이 보수적이지만 합리적인 판단 기준을 제시함으로써 관련 규정에 따라 향후 납품될 무기체계에 적용하여 효율적인 무기체계 전력화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Enforcement Rule Of The Defense Acquisition Program Act, "Quality Management Rule of The Defense Acquisition Program", Administrative rules of the DAPA No. 794, 2023.
- [2] S. G. Park, S. B. Kim, W. J. Pa가, "Upside-Down Bathtub-Shaped Three-Segmented Failure Intensity Model for Repairable Systems", Journal of Applied Reliability, Vol.22, No.4, pp. 385-392, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33162/JAR.2022.12.22.4.385>
- [3] H. S. Chai, J. W. Shin, T. J. Lim, J. C. Kim "Failure Rate Calculation using the Mixture Weibull Distribution,". The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol.66, No.3, pp. 500-506, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.3.500>
- [4] B. M. Jang, J. W. Lee, "Study on the Replacement Period Decision for Clearance Detectors in Railway Turnouts Using Bathtub Curve". Journal of the Korean society for railway Vol. 21, No. 11, 2018.
- [5] Y. K. Son, J. H. Ryu, "Sensitivity analysis of reliability estimation methods for attribute data to sample size and sampling points of time", Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No. 2, pp. 581-587, 2011.
- [6] B. J. Kim, J. S. Kim, "A Study on the standard of ESS Requirement based on MIL-HDBK-344A", The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 15, No. 2, pp. 335-342, 2020. DOI: <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2020.15.2.335>
- [7] Y. G. Lee, S. K. Hong, J. S. Ha, "A Research on Determination Method of Optimum Warranty Period Based on Operation Reliability of Weapon System," Journal of Defense Quality Society Vol. 4 No. 1, pp. 126-135, 2022.
- [8] MIL-HDBK-344A, Environmental Stress Screening Of Electronic Equipment, 1988.
- [9] H. G. Hwang, D. W. Park, J. I. Park, J. S. Lee, K. S. Rhyu, "A development of facility management system providing alarm function for fault effect and replacement of each componen". Journal of the Korean Society of Marine Engineering Vol. 38, No. 4, pp. 456-462, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.4.456>
- [10] C. H. Cho, S. Y. Sung, S. I. Lee, J. S. Lee, "A Comparative Research of the results of Reliability Prediction and Field Data for Guided Missile Component in Different Operating Environment/Temperature". Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 23, No. 9 pp. 415-423, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.9.415>

이 기 림(Gi-Rim Lee)

[정회원]



- 2014년 8월 : 경상대학교 반도체 공학 (반도체공학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 산업대학원 산업공학 (정보통신공학석사)
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술품 질원 연구원

<관심분야>

레이더 장비, 국방신뢰성

이 상 민(Samg-Min Lee)

[정회원]



- 2013년 2월 : 포항공과대학교 기계공학 (기계공학석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품 질원 선임연구원

<관심분야>

레이더 장비, 국방신뢰성

정 원 용(Won-yong Jeong)

[정회원]



- 2014년 2월 : 영남대학교 전자공학 (전자공학사)
- 2014년 1월 ~ 현재 : 한화시스템 과장

<관심분야>

레이더 장비, 국방품질4.0