

카플란-마이어(Kaplan-Meier) 생존분석 기법을 통한 군수품 적정재고 모델링

이상현^{1*}, 정원용¹, 박현정²
¹한화시스템 양산품보팀, ²국방기술품질원

Proper Inventory Modeling of Munitions through Kaplan-Meier Survival Analysis Technique

Sang-Hun Lee^{1*}, Won-Yong Jeong¹, Hyun-Jung Park²

¹Mass Production Phase Quality Assurance Team, Hanwha Systems

²C4ISR Systems Team, Defense Agency for Technology and Quality

요약 방산업체는 납품한 방산물자에서 보증기간 이내에 규격 불일치 사항(군수품 고장 등)이 발생하면 사후봉사(A/S)를 통해 해당 사항을 해소할 의무가 있다. 사후봉사는 고장 군수품을 탈거하여 수리 후 원복하거나, 보유한 재고를 이용 신품으로 교환하여 방산물자를 가동 가능한 상태로 원복 시키는 것으로 종료된다. 군수품 가운데 수리 리드타임(Lead-time)이 긴 품목은 즉각적인 사후봉사 수행을 위해 적정수준의 재고를 보유하는 것이 필요하다. 본 연구는 당사에서 수행했던 사례를 들어 실제 배치된 군수품의 대부분은 소량생산으로 이루어지므로 비 모수 통계기법인 카플란-마이어 생존분석 기법을 활용하여 얻어진 생존 곡선을 통해 추가고장 및 수리 가능 수량 등을 고려한 군수품의 적정재고 수량을 산출하는 방향을 제시하고자 한다.

Abstract Defense contractors must resolve the issue of a specification inconsistency (e.g., military product failure) that occurs within the warranty period in the delivered defense materials through after-sales service. The post-service service is completed by removing the broken munitions and repairing, restoring, or exchanging the stock with new stock to restore the defense materials to an operational state. Among the munitions, items with long repair lead times must be stocked at an appropriate inventory level for immediate follow-up service. In this study, taking the case of the authors' company, additional failures and repairable quantities were considered through the survival curve obtained using the Kaplan-Meier survival analysis technique, a non-parametric statistical technique, because most of the deployed munitions are produced in small quantities. The authors' suggest a direction for calculating the optimal stock quantity of munitions.

Keywords : Kaplan-Meier, Survival Analysis, Optimal Stock Quantity, Repair Lead Time, Non-parametric Statistical Technique

1. 서론

방산업체는 소요군으로 방산물자를 납품한 후, 보증기간 동안 물자의 규격과 품질을 보증한다. 만약 군수품에

고장 등의 규격 불일치(군수품 고장)가 발생하면, 사후봉사를 통해 이를 해결해야 한다. 실사례로 군위성 사업 중 휴대용 송수신기 전원인가 불량 발생하여 원인 분석 결과 제어반에 문제가 있는 것으로 판단되어 추가 기술

*Corresponding Author : Sang-Hun Lee(Hanwha Systems)

email: bestsh12@naver.com

Received August 16, 2023

Accepted September 1, 2023

Revised August 31, 2023

Published September 30, 2023

검토가 필요한 바, 검토 시간이 오래 걸릴 것으로 판단되어 대체품을 즉각 투입하여 고객이 운용하면서 차질이 발생하지 않도록 조치를 취했다.

사후봉사는 고장난 군수품을 수리하거나 보유 재고를 이용해 신품으로 교환하여 방산물자를 정상 동작 상태로 복구한다. 군수품 가운데 고장 발생이 적고, 수리 리드타임(Lead time)이 적게 소요되는 품목은 사후봉사 수행에 어려움이 없으나, 수리 리드타임이 길고 예상치 못한 고장이 발생하며 추후에도 고장 발생이 예상되는 품목은 방산업체에서 사후봉사를 위한 적절한 수준의 재고를 보유하는 것이 필요하다[1]. 재고가 없는 상황에서 수리 리드타임이 긴 군수품의 고장이 발생하면 즉각적인 사후봉사 수행이 불가능하며 소요군의 전력화 공백을 야기한다[2]. 또한, 사후봉사가 계약에서 정해진 기간 이내에 조치되지 못할 경우 방산업체에는 대군 신뢰저하, 지연배상금 납부 등의 큰 불이익이 발생한다.

충분한 군수품 재고가 확보되면 사후봉사 문제는 해결되지만, 도입단가가 높은 품목에서 불용재고가 발생하면 업체의 수익성에 악영향을 줄 수 있다. 따라서 원활한 사후봉사를 수행하되, 불용재고를 최소화하는 적절한 재고 수량의 산출은 방산업에서 매우 중요한 요소이다[3]. 본 연구는 사후봉사와 관련한 불확실성을 최소화하고 원활한 군수지원을 수행할 수 있도록 고장발생이 예상되며 수리 리드타임이 긴 군수품의 적정재고 수량을 산출하는 방향을 제시하고자 한다.

적정재고의 산출은 시장에서 수집된 고장 데이터를 활용하여 생존분석을 수행, 추가고장 예측수량을 산출하는 데에서 출발한다. 대부분의 방산물자 및 군수품은 소량생산이 이루어지므로 생존분석의 방법으로서 비 모수 통계기법인 카플란-마이어(kaplan-meier) 생존분석 기법[4]을 활용하였으며, 그 결과로 얻어지는 생존 곡선(survival curve)을 통해 기간 별 추가 고장발생을 예측하고 가장 고장이 많이 발생하는 기간의 고장 수량에서 장비가동 영향성을 고려한 안전재고, 기간 내 수리 가능한 수량 등을 고려하여 적정재고를 산출하였다. 본 연구는 실제 당사에서 수행했던 사례를 들어 군수품 적정재고 산출 과정 및 모델링 결과를 기술하였다.

2. 본론

2.1 카플란-마이어(kaplan-meier) 생존분석 이론적 배경

본 연구에서 사용한 생존분석은 관찰대상을 일정기간 추적하여 어떤 사건이 발생할 때까지의 시간을 측정하고, 관찰 시간에 따라 사건이 발생한 시점의 사건 발생률을 계산하는 생존 분석 방법이다. 우선 사건 발생률을 계산하기 전, 적정재고의 산출을 위해서 잔여 보증기간 이내에 추가로 고장발생이 예상되는 수량을 분석해내는 것이 첫 단계이다. 보증기간(3년) 이후에 발생하는 고장은 소요군 보유 수리부속(spare part) 등으로 조치되기 때문에 방산업체가 보유해야 할 적정재고 산출에서는 고려하지 않는다[5].

Table 1은 사용기간, 고장발생 여부 등 실제로 당사에서 수집한 군수품 A의 시장품질 데이터이다. 군수품 A는 해외도입품목으로 비싼 도입단가, 긴 수리 리드타임(6개월), 고장이력 등으로 인해 적정재고를 산출 유지하는 것이 필요하다.

Table 1. Munition A Market Quality Data

Munition A	Period of use(days)	Failure	Remaining Warranty period(days)
#1	1158	Failure	0
#2	843	-	252
#3	769	Failure	*815
#4	1037	-	58
#5	935	-	160
#6	828	-	267
#7	758	-	337
#8	673	-	422
#9	581	-	514
#10	483	-	612
#11	249	Failure	*959
#12	183	Failure	*1039
#13	115	-	980
#14	65	-	1030
#15	0	-	1095

* Reamaining warranty period considering the period of use after repaired

생존분석에 활용될 수집된 시장품질 데이터는 군수품 A 모든 호기의 고장을 기다린 후 얻어진 완전자료(complete data)가 아닌 관측중단자료(censored data)이다[6]. 완전자료의 경우 보다 신뢰도 높은 생존분석이 가능하지만 순차적으로 납품을 수행하는 군수품의 특성을 고려할 때 사후봉사를 위한 적정재고 산출에는 부적합하다.

군수품 A를 포함한 대부분의 군수품은 다품종 소량생산의 특성을 가진다. 이러한 특성은 표본의 수가 충분하지 않으므로 일반적인 수명분포(지수분포, 와이블 분포 등)를 가정하는 모수적 분석방법(최우추정법, 최소제곱법 등)의 활용은 불가능하다. 따라서 군수품 A의 생존분석은 비모수적 분석방법인 카플란-마이어(kaplan-meier) 생존분석을 활용하였다[7].

Fig. 1은 수집된 군수품 A의 시장품질 데이터를 미니탭을 사용하여 도출된 생존곡선(survival curve)[8]이며 사용기간 별 생존율은 Table 2와 같다. 카플란-마이어 생존분석 수행 시 군수품 A # 3, #11, #12의 수리 후 사용기간은 배제하였고 고장까지의 사용기간만을 활용하여 생존분석을 수행하였다.

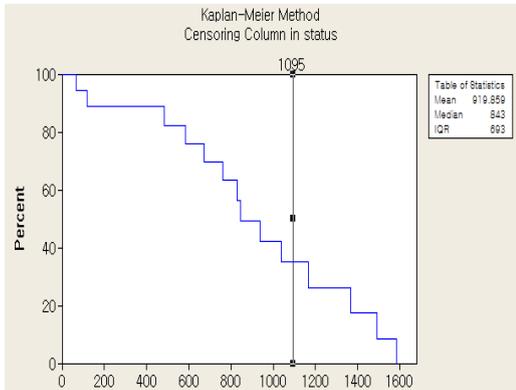


Fig. 1. Muniton A survival curve

Table 2. Muniton A survival analysis result

Survival rate by period of use			
period of use(days)	survival rate(%)	period of use(days)	survival rate(%)
65	94.4	843	49.4
115	88.9	920(MTTF)	49.4
483	82.5	935	42.3
581	76.2	1037	35.3
673	69.8	1095 (warranty period expired)	35.3
758	63.5	1166	26.5
828	56.4	1366	17.6

그 결과 군수품 A의 평균 고장시간(MTTF), 그리고 사용기간 별 생존율을 구했고 야전에 배치된 군수품 A 각각의 사용기간과 사용시간 별 생존율을 토대로 시간흐름에 따른 고장 발생확률을 호기 별로 구해낼 수 있다.

2.2 생존분석을 통한 추가고장 수량 예측 분석

먼저 군수품 A에 대한 생존률의 하락(고장률)을 확인 하고자하는 기간(p)을 결정한다. 그리고 도출된 생존 곡선과 야전 배치된(배치예정 포함) 군수품 A의 사용기간(사용일)을 활용하여 시간의 흐름(0, p, 2p, 3p...)에 따른 고장률을 Table 3과 같이 계산해 낼 수 있다[9].

Table 3. Failure rate over time by unit A of munitions

Failure rate over time by unit A of munitions							
Number of units(date of use)	D+0.5 year	D+1 year	D+1.5 year	D+2 year	D+2.5 year	D+3 year	Sum (%)
#2(843)	7.1%	7%					14.1
#3(280)	0	12.7%	12.7%	21.2%	7%		53.6
#4(1037)	0						0
#5(935)	7%						7
#6(828)	14.1%	7%					21.1
#7(758)	21.2%	7%					28.2
#8(673)	20.4%	14.1%	0				34.5
#9(581)	12.7%	21.2%	7%				40.9
#10(483)	6.3%	26.8%	14.1%	0			47.2
#11(136)	0	6.4%	12.7%	20.4%	14.1%	0	53.6
#12(56)	11.1%	0	12.7%	12.7%	21.2%	7%	64.7
#13(115)	0	6.4%	12.7%	20.4%	7.1%	7%	53.6
#14(65)	5.5%	0	12.7%	12.7%	21.2%	7%	59.1
#15(0)	11.1%	0	6.4%	12.7%	20.4%	14.1%	64.7
합계(%)	116.5	108.6	91	100.1	91	35.1	542.3

* Slash Space : Warranty period expired

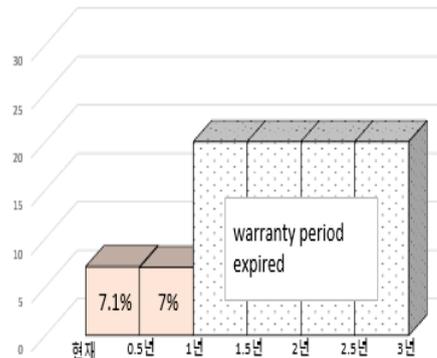


Fig. 2. Muniton A #2 failure rate by period

군수품 A #2의 경우 현재시점(D)의 사용기간은 843일이며 생존 곡선에 따른 현재시점의 생존율은 49.4%이다. 6개월을 더 사용하면 사용기간은 1025일이며, 이때의 군수품 A의 생존율은 42.3%로 현재 시점 대비 생존

율이 7.1% 하락한다. 즉 군수품 A #2의 최초 6개월간의 고장발생 확률은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 7.1%이다. 이러한 방식으로 군수품 A에 대하여 호기 별로 시간 흐름에 따른 고장률을 계산해 낼 수 있으며 본 연구에서는 이를 ' $f_{K \cdot M-i}(t)$, ($i =$ 호기, $t=np$) ' 로 정의하고자 한다. 본 연구에서는 보증기간 내에서 6개월(p) 단위로 구분하여 기간 별 고장률을 계산하였다. 기간의 구분(p)은 군수품의 보증기간, 고장 리드타임, 사업 특성 등을 고려하여 적절하게 산정하여야 한다.

군수품 A의 호기 별 시간흐름에 따른 고장률을 모두 더하면 ($\sum_{i=2}^{15} f_{K \cdot M-i}(t)$ 단, $t=p, 2p, 3p... np$) 군수품 A전체에서 추후 발생하는 추가 고장의 수량을 기간 별($t=p, 2p, 3p...$)로 계산 해 낼 수 있다. 군수품 A는 모두 생산 공정이 끝난 상태이며 특정 호기에서 고장이 발생하더라도 타 호기에 영향을 주지 않으므로 군수품 A에서 발생하는 각각의 고장은 독립사건임을 전제로 한다.

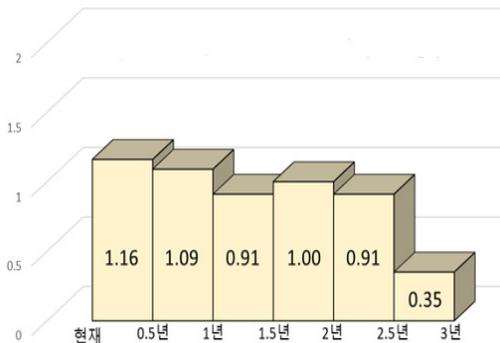


Fig. 3. Quantity of additional failure forecast by period for munitions A

생존분석 결과 Fig. 3에서 보는 바와 같이 군수품 A는 향후 3년 안에 5.42대의 추가고장이 발생할 것으로 예측되며, 최초 6개월 동안 1.16대로 추가고장이 최대로 발생할 것으로 예측된다.

2.3 군수품 적정재고 산출 모델링 결과

군수품 A의 추가고장 예측 수량은 향후 3년간 총 5.42대이지만 적정재고는 추가고장이 최다발생 할 시기를 고려하여도 무방하다. 고장 최다발생이 예상되는 기간 동안 원활한 군수지원을 수행할 수 있다면 다른 기간에도 군수지원에 무리가 없기 때문이다.

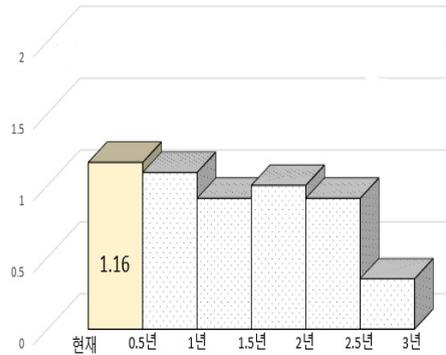


Fig. 4. Muniton A predicted number of additional maximum failures

군수품 A의 최다 고장발생 예측 수량 ($\sum_{i=2}^{15} f_{K \cdot M-i}(p)$ = 1.16)은 최초 6개월($t=p$)로 Fig. 4에서 보는 바와 같이 1.16대이다. 이 기간 동안 원활한 군수지원 수행을 위해서는 고장예측 수량 이외에 불확실성을 고려한 안전재고의 확보가 필요하다. 예측된 고장 수량은 비모수 분석방법을 통한 결과로 예측 결과를 절대적으로 보장하지 않는다. 적정재고는 나누어진 기간($p, 2p, 3p...$) 가운데 최다 고장발생 예측수량 ($\sum_{i=2}^{15} f_{K \cdot M-i}(t)$, $t = np$)에서 군수품의 체계 영향성, 고장 발생 시 장비가동제한 정도 등 사업특성을 고려한 안전재고(z)[10]를 더해주어야 하며 ($\sum_{i=2}^{15} f_{K \cdot M-i}(t) + z$), 설정된 기간 동안 군수품이 수리 가능한 수량(q)을 제외해주는 것 ($\sum_{i=2}^{15} f_{K \cdot M-i}(t) + z - q$) 이 바람직하다.

본 연구의 예시인 군수품 A의 경우 최다 고장발생 예측수량 ($\sum_{i=2}^{15} f_{K \cdot M-i}(p)$) 1.16대에서 사업특성을 고려하여 안전재고($z=2$)를 더한 뒤 설정된 기간(6개월) 동안 수리가 가능 수량($q=1$)을 제외하여 적정재고를 2.16대를 산출하였다.

$$\sum_{i=2}^{15} f_{K \cdot M-i}(p) + 2 - 1 = 2.16$$

실제 당사에서는 적정재고 모델링 결과를 참조하여 군수품 A의 적정재고를 2대로 결정하였다. 본 연구의 결과인 군수품 적정재고 모델링을 수식화하면 Eq. (1)과 같다.

$$\sum_i^l f_{K \cdot M-i}(t) + z - q / t = np \quad (1)$$

$f_{K \cdot M-i}(t)$ = Kaplan-meier survival analysis results
 (Number of additional failures by period)
 p = Setting period (n is a natural number at which the most failures occur)
 i = Munitions by unit
 z = Safety stock
 q = Quantity that can be repaired within the set period

3. 결론

본 연구는 방산업체가 후속지원(A/S) 시 예상치 못한 리스크가 발생했을 경우, 즉각적 대응을 위한 적정재고 산출을 카플란-마이어(Kaplan-meier) 생존분석을 통해 모델링하였다. 이를 통해 군수품의 최다 고장 발생 예측 수량을 사전에 파악하여 적정재고를 준비함으로써, 사후 봉사 리스크를 줄일 수 있다는 점에서 그 의미가 크다.

연구 결과를 요약하면 실제 시장에서 수집된 품질데이터를 미니랩을 활용하여 군수품 사용기간 별 생존율을 생존 곡선을 산출하였고 이를 토대로 시간 흐름에 따른 고장 발생확률을 알아냈다. 고장 발생확률 데이터를 기간별로 나눠 최다 고장 발생 시점 및 예측 수량을 사전에 파악하여 적정재고를 산출하였고 이를 토대로 사후봉사를 진행한다면 상당 부분 리스크가 해소될 것으로 판단된다.

다만, 본 연구는 비모수 분석방법을 통해 수행되었기에 불확실성을 지니므로 향후 불확실성을 줄일 수 있도록 다양한 경로에서 확보된 데이터로부터 제공되는 정보를 이용하여 군수품의 정상 동작 또는 실패나 고장 발생 가능성을 확률분포 함수의 형태로 나타내며 데이터가 축적될수록 정확도는 점점 향상되는 베이지안 기법을 적용하여 연구를 진행하고자 한다.

REFERENCES

[1] K. S. Nam, S. A. Moon, "A Study on Calculating the Proper Purchase Suspension Point for Repair Parts of Military Equipment Scheduled for Disposal" Korea Acadmia-Industrial Cooperation Society, pp. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.6.231>

[2] Y. J. Kim, "A Study on the Determination of Appropriate Supply Level of Repair Items for Just-in-time Military Supply System", Ph.d dissertation, Myongju University, pp. 15~16

[3] H. G. Yoo, "Proper Inventory Management Plan for Repair Parts". Security Managemnet Institute, pp. 9~12, 2014.

[4] S. G. Seo, "Minitab reliability analysis" Ire-tech, p81~85, pp. 229~234.

[5] S. Y. Nam, S. H. Kim, S. A. Moon, "A Prediction Model for Additional Requirement of Fighters In Wartime Considering Shoot-Down and Breakdown" Korea Logistics Society, pp. 5~8, 2016. DOI: <https://doi.org/10.15735/klj.2016.24.1.005>

[6] S. M. Kim, "Business Failure Prediction Using Survival Analysis and Survival Time Analysis" Korea Credit Guarantee Fund, pp.3~4, 2011.

[7] C. K. Min, C. D. Kang, "Survival Analysis of Commercial Facilities in the Proliferation of Trade Areas" The Seoul Institute, pp. 8~9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.23129/seouls.22.2.202106.17>

[8] K. H. Han, K. H. Choi, "A Study on life Prediction of Relay for Point-Machine usin Kaplan Meier" Korean Society for Railway, pp. 4~6, 2016.

[9] J. Y. Oh, "Reliability prediction of Weapon System Based on Mixing Method of Failure Rate Data", Master's thesis, Ajou university, pp. 26~34

[10] H. S. Park, W. Y. Choi, "Application Case of Safety Stock Policy based on Demand Forecast Data Analysis" Korean Society of Industrial and Systems Engineering, pp. 3~6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.11627/jkise.2020.43.3.061>

이 상 헌(Sang-Hun Lee)

[정회원]



- 2017년 2월 : 한국산업기술대학교 신소재공학 (신소재공학사)
- 2022년 2월 ~ 현재 : 한화시스템 연구원

<관심분야>

정보통신, 품질공학

정 원 용(Won-Yong Jeong)

[정회원]



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

<관심분야>

품질공학, 국방품질4.0

박 현 정(Hyun-Jung Park)

[정회원]



- 2011년 8월 : 경북대학교 전자공학 (전자공학사)
- 2017년 9월 ~ 2019년 1월 : 국방 과학연구소 기술원
- 2019년 1월 ~ 현재 : 국방기술품 질원 선임연구원

<관심분야>

전자공학, 품질공학