소방펌프차의 수명 예측을 위한 통계적 방법 연구

천창섭 · 김승모^{*†}

세종소방본부 소방행정과장, *한국기술교육대학교 기계공학부 부교수

A Study on Statistical Methods for Prediction of Service Life of Fire Trucks

Chang-Sub Chun · Seung-Mo Kim^{*†}

Chief, Division of Fire Administration, Sejong City,

^{*}Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology & Education

(Received March 4, 2021; Revised March 26, 2021; Accepted March 29, 2021)

요 약

현재 소방펌프차의 수명은 자산의 시간 경과에 따른 가치변화를 산정한 경제수명이다. 화재 현장에서 진화기능을 수행하는 소방펌프차는 본연의 기능 수행 가능성에 따라 교체 시기를 판단하는 것이 바람직하다. 본 연구는 소방펌프차의 수명을 경제적 관점이 아닌 기능적 관점으로 접근하였다. 한국소방산업기술원이 2019년 점검한 342대의 소방펌프차 중 펌프가 고장 난 102대의 차량별 고장률을 측정하여 동일한 차량의 소방펌프차 100대로 가정한 후 5년 차량의 고장률을 적용하여 5년 차량의 고장차 수를 구하고, 이 수를 제외한 나머지 수 중 6년 차량의 고장률을 곱하여 6년 차량의 고장차 수를 구하는 식으로 하여 10년 차량의 고장차 수까지 빼 후 남은 수는 관측중단으로 제외된 수로 산정하였다. 이렇게 보정된 100개의 표본을 일반적인 신뢰성 분석방법을 통해 수명을 계산했다. 그 결과 소방펌프차의 수명분포는 와이불(Weibull)분포를 따르며 평균수명은 7.65년으로 현재 경제적 수명인 내용연수 10년에 2.35년이 짧은 결과를 보여 주었다. 현재의 수명 관련 규정이 개정되기 전 소방펌프차의 내용연수가 8년이었던 점을 고려할 때 소방펌프차의 수명에 대한 정밀점검 데이터를 이용한 통계적 예측방법은 충분한 가치를 가진다.

ABSTRACT

The current methods of calculating the economic productivity of fire pumpers reduce the value of the vehicle based on its lifetime use. However, it is reasonable to base the service time of a fire pumper on its original function. In this study, we proposed the use of the functional approach to determine the productivity of fire pumpers as opposed to the use of the economic approach. The Korea Fire Institute is a professional institution that inspected 342 fire pumpers in 2019. In all, 102 pumpers were found to be malfunctioning. The number was modified to 100 cases considering the production date and results of statistical analysis. Next, we determined a mean time to failure (MTTF) of 7.65 years based on the service time data using Weibull distribution; this MTTF is 2.35 years shorter than the current mean service time of the pumpers, so this study selected a reasonable service time of 8 years for a pumper.

Keywords : Fire Pumper, Statistical method, Lifetime prediction, Weibull distribution

1. 서 론

소방장비의 교체는 소속 행정기관의 재정 여건과 맞물려 적절한 시기에 이루어지기 어렵다. 재정 사업 우선순위에 밀려 경제적 수명인 내용연수를 지키지 못하는 경우가 대부분이며 소방자동차의 경우 노후율을 낮추기 위해 내용연수 연장을 추진하여 언론의 질타를 받기도 하였다⁽¹⁾. 본

연구의 대상인 소방펌프차는 8년이던 내용연수가 10년으로 늘어났다.

당시 정책 수립의 근거가 되었던 연구용역은 소방자동차 관련 산업과 대학교의 전문가와 면담하고 지방자치단체 소방공무원의 설문조사로 내용연수를 산정하고 이를 미국, 일본 등의 해외 사례와 비교하여 타당성을 검증하였다⁽²⁾. 시간 경과에 따른 성능의 저하와 고장률을 이용한 통계적

Table 1. Number of Firetrucks with Pump(2018)⁽³⁾

Total	Pumper	Tank	Chemical truck
3220	2144	765	311

방법에 관한 연구는 찾아볼 수 없다.

이러한 한계로 소방자동차의 수명을 재정 여건에 종속된 단순한 경제적 문제로만 인식하여 연식이 증가함에 따라 소방펌프차의 방수성능이 저하하는 문제는 크게 부각되지 못하였다.

2013년 한국소방산업기술원에 설치된 소방장비 검사·검수센터에서 전국의 5년이 지난 소방자동차를 주기적으로 검사하면서 고장데이터가 축적되면서 고장률 기반의 수명 예측이 가능하게 되었다.

본 연구는 한국소방산업기술원에 축적된 고장데이터를 이용하여 소방펌프차의 수명을 자산의 시간 경과에 따른 가치변화를 반영하여 산정한 현재의 경제적 수명 기준이 아닌 화재 진화라는 본연의 기능을 수행할 수 있는 지에 따른 기능적 수명 기준을 위한 통계적 방법에 따라 정밀 예측하고자 하였다. 트럭에 펌프와 물을 담은 탱크를 탑재한 소방자동차는 위 Table 1과 같이 몇 가지 종류로 분류되며, 전국 소방관서에서 운용하는 차의 규모는 2018년 말을 기준으로 3,220대에 이른다.

이중 본 논문의 연구대상은 펌프차로 총 2,144대이다. 사용한 트럭의 차대 크기에 따라 소형, 중형, 대형으로 나누어지며 중형이 대부분을 차지한다.

2. 본 론

2.1 경제수명

장비 수명은 장비가 운용 목적을 충족하면서 지속하는 기간⁽⁴⁾을 말하는데, 주요 결정 요인은 ‘비용’과 ‘성능’이다.

장비를 유지하는 데 드는 비용이 증가하여 장비를 운용하는 것이 비경제적 상태에 이르는 기간을 경제수명이라 하는데, 장비의 교체 시기를 결정하고 이를 위한 예산 소요를 판단하기 위함이 목적이다. 장비는 초기 획득단계에서는 높은 투자비가 들지만, 장비의 운용 기간이 증가하면 유지관리비도 커진다. 즉, 장비를 운용할수록 노후 되고 이에 따라 수리비와 정비비가 증가한다.

이러한 초기 투자비와 유지비의 변화 추세를 분석하여 가장 경제적인 장비의 교체 시기를 결정하는 것이 경제수명 결정이론이며, 평균 시스템 비용법, 누적 유지비용법, 연등가비용법 등이 있다.

Table 2의 소방펌프차의 수명은 「소방장비 내용연수 지정고시」에 규정되어 있고, 일반 정부 자산의 교체기준으로 정하는 경제적 관점에 기반을 두고 있다.

Table 2. Lifetime (year) of Principal Firetrucks

Pumper	Chemical truck	Ladder	Ambulance
10	10	12	5

2.2 유효수명

장비의 유효수명은 사용 기간의 증가로 주어진 조건에서 고장 강도를 받아들이 수 없거나 결함으로 인하여 품목의 수리가 불가능하다고 여겨질 때까지의 기간으로 주요 품목의 고장률이 급격히 증가하여 목표 성능을 더 유지할 수 없는 시점까지의 기간을 말한다⁽⁵⁾.

소방펌프차는 화재가 발생한 곳에 충분한 물을 보내 소화할 수 있어야 한다. 그러나 도로 폭이나 인접한 건물의 장애로 투입할 수 있는 자원은 시·공간적 제약을 받는다. 따라서 임무에 선택적으로 투입된 자원은 최상의 성능을 발휘해야 전략적 성공을 기대할 수 있다. 만약 고장으로 정상적인 성능을 발휘하지 못할 경우, 화재 진압이라는 소방조직의 고유한 목표 달성은 실패할 수도 있다.

소방펌프차에서 불이 난 곳까지 물을 보내는 기능은 소방펌프가 담당한다. 차대에 탑재한 엔진으로부터 추출한 동력으로 소방펌프를 구동하여 별도로 설치된 물탱크의 물을 배관을 통해 내보내게 된다. 소방펌프는 축 방향으로 물을 흡입하여 축과 직각 방향으로 방출하는 원심펌프 유형이고 성능에 대하여는 한국소방산업기술원의 인증을 받아야 한다.

소방펌프의 성능은 시간의 경과에 따라 저하되는데 특히 펌프 내 누설로 인하여 고압에서 발생하는 체적효율의 저하는 고층 소방대상물의 화재를 진압하는데 필요한 충분한 물을 보낼 수 없는 문제를 일으킬 수 있다.

따라서 소방펌프의 누설을 고장으로 규정하고 발생징후로부터 그 고장을 예측하여 사전에 사용을 중단하는 성능 중심의 수명관리가 필요하므로 소방장비의 수명을 자산의 경제적 목적에서의 교체 시기를 예측하는 경제수명이 아니라 정상적인 성능의 유지 차원에서 유효수명을 기반으로 산출하는 것이 타당하다.

2.3 소방펌프의 고장

본 연구에서 규정하는 소방펌프의 고장은 노후로 인해 기밀성능을 규정 값 이내로 유지할 수 없는 상태이며 소방펌프차에 탑재된 상태에서 한국소방산업기술원 소속의 기술자에 의하여 측정된다.

정밀점검 항목의 하나로 소방펌프의 토출 배관 의 메인 밸브를 잠그고 약 1,400 rpm에서 펌프를 가동하여 토출 측 체적압력이 7 kgf/cm²에 이르게 한 후 무부하 회전수(약 750 rpm)로 급격히 낮춘 후 60 s 간 토출 측 압력의 저하를 측정하고 그 값이 1 kgf/cm² 미만인지 판단하여 그 값 이상이 되면 고장이다.

따라서 ‘펌프실의 압력 유지 불가’의 고장률을 기반으로

수명을 예측하는 본연구의 방향은 실용적 측면에서 매우 의미 있다고 볼 수 있다.

2.4 유효수명의 계산

2.4.1 고장과 신뢰도

신뢰도 $R(t)$ 는 수명 T 가 t 보다 클 확률로 아이템이 t 의 시간까지 생존하는 확률이다.

$$R(t) = P(T > t) \quad (1)$$

임의 시점 t 이전에 고장이 나는 확률인 불신뢰도함수인 $F(t)$ 는 식 (2)로 표현된다.

$$F(t) = p(T \leq t) = 1 - R(t) \quad (2)$$

단위 시간당 고장 발생비율을 나타내는 함수인 고장확률밀도함수(Failure probability density function)는 불신뢰도함수를 시간에 대하여 미분하여 구할 수 있으며 식 (3)과 같다.

$$f(t) = \frac{d}{dt}F(t) = -\frac{d}{dt}R(t) \quad (3)$$

가동 중인 제품이 순간적으로 고장 날 비율인 고장률 함수는 식 (4)가 되고

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{1}{R(t)} \frac{-dR(t)}{dt} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad (4)$$

양변에 적분을 취하면 누적고장률 함수 $H(t)$ 이 되며 식 (5)와 같다.

$$H(t) = \int_0^t h(t)dt = -\int_0^t \frac{R'(t)}{R(t)}dt = -\ln R(t) \quad (5)$$

2.4.2 수명 분포

신뢰성 분석에서 가장 널리 사용되는 수명분포는 지수분포(Exponential distribution)와 와이블 분포(Weibull distribution)이다.

1) 지수분포

지수분포는 연속분포 중에서 유일하게 상수 고장률을 가져 수학적 계산의 용이성과 통계적 가설검정법이 확립되어 있어 널리 이용된다.

작동시간 t 와는 독립인 일정 고장률 $h(t) = \lambda$ 을 사용하면 누적 고장률 함수는 식 (6)과 같다.

$$H(t) = \lambda t \quad (6)$$

이때 평균수명(Mean time to failure)은 식 (7)로 구한다.

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt = \int_0^\infty e^{-\lambda t} = \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

2) 와이블 분포

와이블 분포는 신뢰성 분석에서 가장 폭 넓게 사용되는 수명분포 중 하나이다. 와이블 분포는 물질의 강도를 모형화하기 위해 스웨덴의 와이블(W. Weibull, 1887~1979) 교수에 의해서 개발되었다. 수명 T 가 와이블 분포를 따르면 누적고장분포함수는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}, t > 0 \quad (8)$$

여기서 $\eta(>0)$ 는 척도모수(Scale parameter), $m(>0)$ 는 형상모수(Shape parameter)를 나타낸다.

와이블 분포의 고장확률밀도함수는 식 (8)의 누적분포함수를 미분하여 식 (9)와 같이 얻을 수 있다.

$$f(t) = \frac{d}{dt}F(t) = \frac{m}{\eta^m} t^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}, t > 0 \quad (9)$$

와이블 분포의 신뢰도와 고장률 함수는 각각 식 (10)과 식 (11)로 구할 수 있다.

$$R(t) = \Pr(T > t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}, t > 0 \quad (10)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{m}{\eta^m} t^{m-1}, t > 0 \quad (11)$$

와이블 분포는 적절한 형상모수의 값을 선택함으로써 세 가지 유형의 고장률 형태를 모두 표현할 수 있다. 모수의 값이 결정되면 평균수명은 식 (12)로 결정된다.

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (12)$$

형상모수(m)는 고장분포의 형태를 결정하는 매개변수로 크기에 따라 Table 3과 같이 분포 형태가 달라진다.

2.4.3 적합도 분석

수집된 수명자료가 지수분포와 와이블 분포 중 어떤 분포에 더 적합한지를 판단하기 위하여 적합도 검정을 수행해야 한다.

Table 3. Failure Distribution as Shape Parameter

Shape parameter	Type of distribution	Curve shape
$m < 1$	Gamma	Decreasing failure rate
$m = 1$	Exponential	Constant failure rate
$m > 1$	Normal	Increasing failure rate

대표적으로 이용되는 검정방법으로 A-D검정법(Anderson-darling)과 K-S검정법(Kolmogorow-smirnov)이 있다.

A-D적합도 검정은 연속분포에 적용할 수 있는 적합도 검정방법의 하나로서 확률지에 도식된 점과 이들을 적합한 직선의 대응점과의 차이를 측정한 값이며, 분포의 꼬리 부분에 큰 가중치를 가지도록 적합한 직선과 도식된 점과의 가중된 제곱 거리의 합을 구한 값이다. 즉, 수명자료를 대상으로 분포 적합 시 여러 후보 분포 중에서 더 작은 A-D 통계량 값을 가지는 분포에 보다 잘 적합된다는 것을 의미한다.

K-S적합도 검정은 A-D검정과 같이 연속분포에만 적용할 수 있지만 분포의 꼬리와 중앙에 동일한 가중치를 부여하여 꼬리 부분의 분포 적합도 판정 시 검정력이 떨어진다.

본 논문에서는 A-D검정을 실시하였다.

2.4.4 모수 추정법

수명분포에 적합한 모수는 최소제곱법(Least square estimation, LSE)과 최우추정법(Maximum likelihood estimation, MLE)으로 추정한다. 일반적으로 확률지에 도식된 점을 일차 직선으로 추정하는 방법으로 소 표본 또는 완전 자료이거나 이에 가까운 관측중단 자료의 경우에만 사용하는 최소제곱법보다 우수한 정밀도를 제공하는 최우추정법을 많이 사용한다⁽⁶⁾.

본 논문에서는 최우추정법을 이용한다. 최우추정법으로 비선형 방정식의 해를 구하기 위하여 수치해석적 방법을 이용한다.

와이블 분포를 따르는 n 개의 시료에 대한 고장시간이 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 이라고 하면, 우도함수는 식 (13)이 되고,

$$L(m, \eta; t) = \left(\frac{m}{\eta}\right)^n \prod_{i=1}^n t_i^{m-1} e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m} \quad (13)$$

이에 자연대수를 취하여 나온 연립방정식을 풀면 다음의 두 식 (14)와 (15)를 구할 수 있다.

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{m}} \ln t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{m}}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i = \frac{1}{\hat{m}} \quad (14)$$

Table 4. Number of Pumper along Year

Category		5Y	6Y	7Y	8Y	9Y	10Y	10Y+
Total	342	14	81	29	52	35	131	
Failure	102	4	14	8	10	8	58	
Percent	-	28.6	17.3	27.6	19.2	22.9	44.3	

$$\hat{\eta}^{\hat{m}} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^{\hat{m}}}{n} \quad (15)$$

여기서, 관측 중단이 있는 경우, 위 두 식은

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{m}} \ln t_i + (n-r)t_r^{\hat{m}} \ln t_r}{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{m}} + (n-r)t_r^{\hat{m}}} - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln t_i = \frac{1}{\hat{m}} \quad (16)$$

$$\hat{\eta}^{\hat{m}} = \frac{1}{r} \left\{ \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{m}} + (n-r)t_r^{\hat{m}} \right\} \quad (17)$$

이 되며 $\hat{m}$ 에 초기값을 대입하고 위 연립방정식에서 구한 새로운 $\hat{m}$ 값을 다시 방정식에 대입하는 반복 계산을 통해 그 차이가 일정한 값 이하가 될 때까지 반복한다.

이 식으로부터 구한 두 모수를 평균수명 계산식 (12)에 대입하여 평균수명을 계산할 수 있다.

2.5 소방펌프차의 수명계산

2.5.1 고장데이터 분석

한국소방산업기술원이 2019년 정밀점검한 소방펌프차는 Table 4와 같이 총 354대로 2019년 전국 소방펌프차 2,144대 중 16.5%에 해당하는 규모이다. 사용환경이 이질적인 소방학교 소유의 차량과 내용연수를 초과한 차량을 제외한 대상은 342대이고, 이 중 소방펌프의 고장이 발생한 차는 102대이다.

그러나, 대상 차량의 도입 시기(취득일)가 다르고, 동일한 차량의 점검대상 수가 균일하지 않으며, 1회의 점검으로 획득한 자료이므로 수명 예측을 위해서는 자료의 보정이 필요하다.

자료보정을 위해서 동일한 차량의 소방펌프차 100대가 5년이 도래했을 때 처음 고장이 발생한다고 가정하고 실제 측정된 5년 차량의 고장률을 적용하여 5년 차량의 고장차 수를 구하고, 이 수를 제외한 나머지 수 중 6년 차량의 고장률을 곱하여 6년 차량의 고장차 수를 구하는 식으로 하여 10년 차량의 고장차 수까지 계산하고, 100대에서 각 수명의 고장차 수를 뺀 수는 관측중단으로 제외된 수로 산정한다.

이렇게 보정된 자료는 Table 5의 자료와 같다.

Table 5. Failed Time of Pumper

Time (month)	54 ~ 66	66 ~ 78	78 ~ 90	90 ~ 102	102 ~ 114	114 ~ 126	126 ~
100	27	13	17	8	8	12	15

Figure 1. Probability plot of lifetime data.

2.5.2 수명분포 적합도 검증

통계분석은 Minitab Release 20 한글 평가판을 이용하였다.

일반적으로 신뢰성 분석에 가장 많이 사용되는 와이블 분포와 지수분포를 대상으로 Figure 1과 같이 A-D값을 산출한 결과, 와이블 분포 3.498, 지수분포 4.387로 크기가 작

Figure 2. Probability density & failure function.

은 와이블 분포가 상대적으로 적합도가 높은 것으로 나타났다.

2.5.3 와이블분포에 의한 수명계산

소방펌프차의 수명자료에 대한 고장확률밀도함수와 고장 함수는 아래 Figure 2와 같다.

95% 신뢰구간과 추정 직선은 Figure 3과 같다. 와이블 분포 분석을 통해 얻은 형상모수와 척도모수를 위 식 (12)에 대입하여 평균수명을 구하면 평균수명은 91.8월로 약 7.65년이다.

3. 결 론

소방차량 검수의 전문기관인 한국소방산업기술원이 2019년 점검한 342대의 소방펌프차 중 핵심부품인 펌프가 고장 난 102대에 대하여 차량별 고장률을 이용하여 100대의 표본으로 보정하고 일반적인 신뢰성 분석 방법을 통해 수명을 계산해 보았다.

그 결과 소방펌프차의 수명분포는 와이블 분포에 적합하여 시간 경과에 따라 고장률이 증가하는 특성을 보여주었고, 평균수명은 91.8월, 약 7.65년으로 예측할 수 있었다. 이는 현재 내용연수 10년에 2.35년 짧은 수치이나 현재의 내용연수로 개정하기 전 소방펌프차의 내용연수가 8년이었던 점에서 통계적 접근방법에 의한 시도는 어느 정도

Figure 3. Probability plot of lifetime data (95%).

의미를 가진다고 볼 수 있다.

현재 내용연수는 경제적 관점에서 일반 자산의 경제적 가치에 대한 시간적 하락을 기준으로 산정하는 수명이다. 관련 과학기술과 사용환경 등이 개선되면 가치가 오래 유지되어 수명이 늘어나는 것이 타당하다. 이는 소방펌프차의 내용연수를 8년에서 10년으로 연장하는 논리로 사용되었다.

그러나 소방펌프차는 화재현장에서 설계된 기능을 정확히 수행하여 화재로부터 인명과 재산을 보호할 수 있을 때 그 가치가 있으며 이는 차량으로서 이동능력과 함께 소화용수를 화재지점에 적절하게 보낼 수 있는 기능이 수행될 때 인정받을 수 있다. 자동차 선진국으로서 우리나라의 위상을 고려한다면 이동기능은 다른 나라의 수준과 견주어 불만한 수준이라 하더라도 중소기업에서 생산되는 소방펌프는 실제 소방펌프차의 기능적 가치를 결정하는 요소며 이를 기준으로 소방펌프차의 수명을 산출할 필요가 있다는 점에서 본 연구의 방향설정은 타당하다.

연구대상이 된 소방펌프차의 재원과 성능, 품질이 균일하고 사용환경도 동일한 것으로 가정함으로써 오차 발생은 불가피하였고, 실제 펌프 사용시간을 단순한 시간 경과로

대체하는 한계를 보여주었다.

향후 동일한 재원의 소방펌프차를 대상으로 실제 펌프의 사용시간을 기준으로 본 연구에서 제안한 통계적 방법을 통해 유효수명을 산출하고 이를 기준으로 내용연수 개정을 검토해 볼 필요가 있으며, 대상 차량을 다른 소방차량으로 확대할 필요도 있다.

후 기

본 논문은 2020년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥 과제와 중소벤처기업부의 기술개발사업(S2871286) 지원으로 연구되었음.

References

1. FPNDaily, "Do You Forget the accident of Old Fire Trucks?", http://www.fpn119.co.kr/sub_read.html?uid=11803 (2010).
2. Y. S. Kim, "A Study on the Research on Fire Truck Durable Years", Proceedings of 2011 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 289-294 (2011).
3. National Fire Agency, "Statistical Yearbook" (2019).
4. J. K. Kim, "A Study of K1 Main Battle Tank Life-Cycle", The Quarterly Journal of Defense Policy Studies, Vol. 26, No. 2, pp. 239-274 (2010). <https://doi.org/10.22883/jdps.2010.26.2.008>.
5. S. H. Baek, Y. S. Lee, K. Y. Kim, J. S. Jung, I. Y. Na, "The Research on the Method of Building Life Decision Process for the Developing Product and Re-Newing Process for the Operating Product", Defense Agency for Technology and Quality (2007).
6. G. W. Jung, "A study on the life prediction of AGL (Aeronautical Ground Lights) components based on reliability analysis", Inha University (2015).