

## 예방정비 최적화를 위한 중도절단 자료의 최적 샘플링 방안

### Optimal Sampling Method of Censored Data for Optimizing Preventive Maintenance

이인현\* · 오세화 · 이창룡 · 양동인 · 이기서

In-hyun Lee · Sea-hwa Oh · Chang-long Li · Dong-in Yang · Key-seo Lee

**Abstract** As there is no failure data for the entire lifecycle of a product, when analyzing reliability measures based on early failure data only, there may be a significant error between the estimated mean life and the real one, because it can be underestimated, or on the other hand, it can be overestimated when analyzing reliability measures based on a large amount of censored data with the failure data. To resolve the issue, this study proposes an optimal sampling estimation procedure that selects the proportion of censored data to estimate the optimal distribution with the idea that the estimated distribution could be approximated as closely as the real life distribution. This would work if we sampled the optimal proportion on the censored data, because failure data has real intrinsic distribution in any situation. We validate the proposed procedure using an actual example. If the proposed method is applied to the maintenance policy of TWC (Train to Wayside Communication) system, then we can establish the optimal maintenance policy. Thus, we expect that it will be effective for improvement of reliability and cost savings.

**Keywords** : Preventive Maintenance, Censored Data, Optimal Sampling, TWC

**초 록** 어떤 제품의 수명주기 전체에 대한 고장 자료가 없을 때 초기 고장 자료만을 이용하여 신뢰성 척도를 분석할 경우에는 과소추정이 될 수 있고, 많은 수의 중도절단 자료를 고장 자료와 함께 활용할 경우에는 과대추정이 되어 실제 수명과 상당한 오차가 존재할 수 있다. 본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 고장자료는 실제 고유의 수명 분포를 갖고 있으므로 중도절단 자료의 비율을 최적으로 표본을 뽑을 경우 추정된 분포와 실제 수명 분포가 근접해질 수 있다는 아이디어로 최적의 분포를 추정하기 위한 중도절단 비율을 선택하는 최적 샘플링 추정 절차에 대해 제안하였고, 실제 사례로 검증하였다. 향후 이 논문에서 제시한 방법을 TWC의 정비 정책에 적용하면 최적의 정비 정책을 수립할 수 있으므로 신뢰성 향상이나 비용 절감 등의 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

**주요어** : 예방 정비, 중도절단 자료, 최적 샘플링, 차 · 지상 간 통신장치

## 1. 서 론

오늘날 과학기술의 급격한 발전으로 인해 시스템은 점점 더 복잡하고 대형화되었으며, 이와 더불어 유지보수 방법이 있어서도 단순히 적절한 시점에서 교체해야 안전성과 신뢰성을 보장할 수 있다는 전통적인 관점에서 대상 기기나 시스템의 특성에 맞게 유지보수 방법을 채택하는 방식으로 진화해왔다. 이러한 현상은 산업의 여러 분야에서 다양하게 나타나고 있다.

항공 산업에서는 제트기가 도입되면서 분석 과정에서의 전문 지식들을 여객기에 대한 예방정비의 효율성 향상에 점차로 적용하게 되었고, 하드웨어의 신뢰성이 사용함에 따라 감소한다는 예방 정비에 대한 근본적인 이유 때문에 처음으로 신뢰성과 수명(내구수명) 간의 관계를 조사하려는 노력이 시

작되었다[1].

예방정비의 최적화에 이용되는 교체정책이나 검사정책에 관련된 모델의 경우, 비용 절감, 신뢰성 및 가용성 향상 등의 목적을 위해 신뢰성 척도가 보통 이용된다. 실제로 현장에 설치된 개폐기용 단말장치의 예방정비 최적화를 위해 고장 이력자료를 조사한 후 신뢰성 분석을 수행하면, 수명주기 동안 사용하지 않은 제품의 경우, 초기의 고장 자료만을 이용하여 신뢰성 척도를 분석할 경우에는 실제보다 작게 추정되었고, 고장 나지 않은 많은 수의 중도절단 자료를 고장 자료와 함께 이용하여 신뢰성 척도를 분석할 경우에는 실제보다 크게 추정되었다.

Hoang Pham은 중도절단 자료를 무시할 경우 신뢰성에 대해서는 실제보다 낮게 추정하게 되고, 수명 분포에 대해서는 실제와 다른 결과를 초래할 것이라고 했다[2].

Dr. Robert B. Abernethy는 와이블 분포의 경우 중도절단 자료는 특성수명(Characteristic life)을 증가시키지만, 형상모수(Shape parameter)에는 별다른 영향을 미치지 않는다고 했다. 또한, 첫 번째 고장이 발생하기 전의 중도절단 자료는 와이블 확률지를 이용한 누적분포함수에 미치는 영향이 미

\*Corresponding author.  
Tel.: +82-2-3215-1199, E-mail : ian.lee@tuv-sud.kr  
©The Korean Society for Railway 2013  
<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.3.196>

미하지만, 마지막 고장 이후의 중도절단 자료는 크게 영향을 미치고 형상모수를 감소시킬 수도 있다고 했다[3].

이 문제에 대한 해결 방안으로 수명분포에 대한 추정치는 초기에 관측한 고장이나 중도절단 자료를 이용하여 분석하고, 중도절단 자료의 경우는 2장에 제한한 최적 샘플링 추정 절차에 따라 분석을 수행하는 것이다. 고장 자료는 실제 고유의 수명분포를 갖고 있으며 중도절단 자료의 비율을 최적으로 표본을 뽑아 분석할 경우 추정된 수명분포와 실제 수명분포가 근접해질 수 있다는 원리이다.

본 논문에서는 최적의 분포를 추정하기 위한 중도절단 비율을 선택하는 최적 샘플링 추정 방법 및 절차에 대하여 제안하고, 개폐장치에 대한 실제 사례를 들어 검증한다. 논문에서 제안된 방법을 이용하여 얻은 결과는 신뢰성 척도의 과소추정이나 과대추정으로 인해 발행할 수 있는 오차를 줄일 수 있기 때문에 예방정비 정책을 결정함에 있어서 기반 자료로써 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

## 2. 최적 샘플링 방법 및 절차

### 2.1 개요

본 논문에서 제안하는 최적 샘플링 방법은 신뢰성 척도의 정확도를 높이기 위한 방법이다. 1장에서 언급한 문제에 대한 해결 방법으로 고장 자료와 경험 기반의 수명 정보를 이용하여 기준이 되는 수명 분포  $F_X$ 를 추정한다. 그리고 현장에서 수집한 중도절단 자료 중  $p\%$ 만을 표본 추출한 자료와 고장 자료를 이용하여 수명분포  $G_p$ 를 추정한다. 추정된  $F_X$ 와  $G_p$ 를 기반으로 조건부 고장확률을 이용하여 운용 기간별로 예상 고장 수를 추정한다. 그런 다음,  $F_X$ 와  $G_p$ 로 구한 기간별 고장 수에 대한 비율을 이용하여 평균제곱오차가 최소가 되는  $p$ 를 최적 비율로 한다. 그리고 나서 추정된  $p$ 를 이용하여  $G_p$ 를 적합시키고, 이 분포에 따른 신뢰성 척도를 추정한다.

### 2.2 수명 추정 절차

#### 2.2.1 고장 자료 분석 절차

통계적으로 고장 자료 분석을 위한 자료의 형태는 고장 자료와 중도절단 자료로 분류되며, 이들 자료를 이용한 분석 방법은 크게 모수적 추정 방법과 비모수적 추정 방법으로 분류된다. 이들 분류를 이용하여 고장자료를 분석하는 절차는 먼저 자료 형태가 중도절단 자료의 유무를 판단하고, 모수적 방법을 선택할 것인지 아니면 비모수적 추정방법을 선택할 것인지를 판단한다. 모수적 방법을 선택할 경우 분포적합 방법에 따라 분포를 적합하고, 적합된 분포의 모수는 모수 추정 방법에 따라 추정하고, 그 결과를 활용하여 분석하고자 하는 신뢰성 척도를 계산한다. 일반적으로 모수 추정은 최우추정법(MLE: Maximum Likelihood Estimation)이나 최소제곱추정법(LSE: Least Squares Estimation) 등과 같은 방법이 많이 이용된다.

비모수적 방법을 선택할 경우 중도절단 자료가 있을 경우

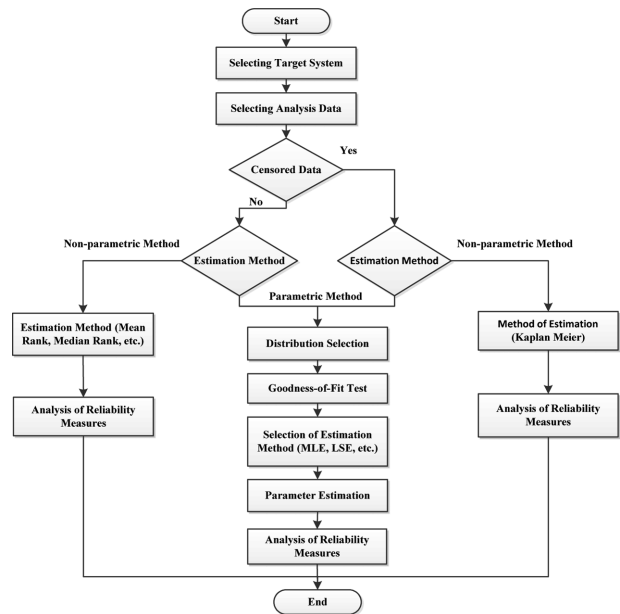


Fig. 1 Failure data analysis process

에는 일반적으로 카플란-마이어 방법을 활용하고, 그렇지 않을 경우에는 평균 순위(Mean Rank) 방법이나 메디안 순위(Median Rank) 방법을 이용하여 분석하고자 하는 신뢰성 척도를 계산한다. 이 절차를 간단히 도식화하면 Fig. 1과 같다.

#### 2.2.2 중도절단 자료의 추정방법

$T_1, T_2, \dots, T_n$ 은 서로 독립이고 동일한 분포를 갖는 수명시간을 나타내는 변수라 하고, 이들에 대한 중도절단 확률변수를  $C_1, C_2, \dots, C_n$ 이라 하자.  $T$ 와  $C$  각각에 대한 분포함수를  $F$ 와  $G$ 라 하고,  $T$ 와  $C$ 는 서로 독립이라고 가정한다. 그런데 실제로 우리가 관측할 수 있는 자료는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(X_i, \delta_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$X_i = \min\{T_i, C_i\} \quad (2)$$

$$\delta_i = I(T_i \leq C_i) \quad (3)$$

여기서,  $n$ 은 관측된 고장 자료 수,  $\delta_i$ 는 중도절단지수, 즉, 고장 자료이면 1, 그렇지 않으면 0을 의미한다. 그리고  $T_i$ 는  $i$ 번째 제품의 수명 자료, 즉, (관측시점-최초 운용 시점)의 실제 운용기간이고,  $C_i$ 는  $i$ 번째 제품의 중도절단 변수를 의미한다.

따라서 관측치들은 분포함수  $H$ 를 갖는 서로 독립인 표본이라고 할 수 있는데  $H$ 는  $1-H=(1-F)(1-G)$ 를 만족하게 된다. 기호의 편의상  $X_i$ 는 서로 다른 값을 가지며 크기 순서로 배열되어 있다고 가정한다. 즉,  $X_1 < X_2 < \dots < X_n$ 이라고 가정한다.

앞에서 언급한 대로 신뢰도 함수에 대한 추정치로는 카플란-마이어 추정치가 가장 보편적으로 사용되며, 여러 가지 좋은 성질들을 가지고 있다. 카플란-마이어 추정치는 식 (4)와 같이 표현할 수 있는데 이는 우연속(Right continuous)인

계단 함수의 형태를 갖는다.

$$\hat{R}(t) = \prod_{i: X_i \leq t} \left(1 - \frac{1}{n-i+1}\right)^{\delta_i} \quad (4)$$

### 2.3 최적 샘플링 추정 절차

수명주기가 아주 긴 제품의 경우, 현재 수집할 수 있는 고장 자료가 전체 자료 중 수명이 짧은 일부분인 상황을 고려해보자. 이 경우 전체 자료에서 수명이 짧은 일부분에 해당되는 고장 자료만을 활용하여 분포를 추정하면 실제보다 아주 짧은 수명 분포를 추정하게 된다. 반대로 현재 운영 중인 많은 수의 중도절단 자료가 있을 경우 이를 고장 자료와 함께 분석할 경우 실제보다 아주 긴 수명 분포를 추정하게 된다. 따라서 고장자료를 이용해서 추정한 분포는 실제 분포에서 수명이 작은 부분에서의 분포와 동일할 것이므로 중도절단 자료를 최적으로 표본 추출하는 방법을 활용하여 운용 자료 중 일부 자료를 추출한 후 획득한 고장자료와 함께 분석한다면 실제 분포에 근사한 분포를 찾을 수 있을 것이다. 이러한 개념을 기반으로 실제 수명분포에 적합한 중도절단 자료의 최적 샘플링 추정 절차를 제안하면 다음과 같다.

(1) 1 단계: 관측한 고장 자료를  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 과 같이 크기 순으로 정리한다.

(2) 2 단계: 운용 중인 제품의 운용 기간을  $Y_1, Y_2, \dots, Y_{N-n}$ 으로 정리한다. 즉, 전체 제품의 수명 중 고장 자료를 제외한 나머지 제품에 대한 운용기간을 정리한다.

(3) 3 단계: 고장 자료와 경험 기반의 수명 정보를 이용하여  $\hat{F}_X$ 를 추정하고, 추정 분포를 이용하여 신뢰성 척도를 추정한다.

(4) 4 단계: 식 (5)가 되는 중도절단 비율  $\hat{p}$ 를 추정한다.

$$\hat{p} = \arg \min_p \sum_{i=1}^n (\hat{F}_X(x_i) - \hat{G}_p(x_i))^2 / n \quad (5)$$

여기서,  $\hat{G}_p$ 는 현재 운용 중인 N-n개의 운용 제품 중 p%만을 표본 추출한 자료와 n개의 고장 자료를 이용하여 추정된 분포 함수이다. 3 단계로부터 추정한  $\hat{F}_X$ 를 기반으로 조건부 고장확률을 이용하여 2 단계에서 정의한 운용 기간별로 예상 고장 수를 추정하고,  $\hat{G}_p$ 에 대해서도 같은 방법으로 추정한다.  $\hat{G}_p$ 와  $\hat{F}_X$ 로 구한 기간별 고장 수에 대한 비율을 이용하여 평균제곱오차(MSE: Mean Squared Error)가 최소가 되는  $\hat{p}$ 를 최적 비율로 한다.

(5) 5 단계: 4 단계로부터 추정한  $\hat{p}$ 를 이용하여  $\hat{G}_p$ 를 적합시키고, 이 분포에 따른 신뢰성 척도를 추정한다.

## 3. 최적 샘플링 실증 사례 및 결과 고찰

### 3.1 중도절단 자료의 최적 샘플링 사례

일반적으로 평균수명이 15여 년으로 알려져 있는 A사의 배전자동화 설비 중 개폐기용 단말장치를 대상으로 2장에서

**Table 1** Number of failures and censored data by use interval for the terminal unit

Use interval (Year)	Number of failure data	Number of censored data
0-1	199	2406
1-2	246	4052
2-3	402	7055
3-4	565	5275
4-5	604	5255
5-6	601	3313
6-7	517	4565
7-8	419	2860
8-9	216	2379
9-10	148	2015
10-11	75	2190
11-12	12	1145
Total	4004	42510

제안한 최적 샘플링 방법을 적용한 사례이다. 현재 국내 모 지역에서 운용 중인 개폐용 단말장치는 대부분 오래 전부터 사용되고 있어서 설치이력은 존재하지만 고장이력을 자료로 정리한 기간은 최근 10여 년에 불과하다. 즉, 그 이전의 고장 이력은 전산화되지 않았거나 보고서 형태로 존재하다가 보존연한이 지나 폐기된 상태이다. A사의 경우 현재 현장에 설치된 개폐용 단말장치는 약 42,000여 개가 되며, 최근 12년 동안 고장 난 개수는 전체의 약 10%인 4,004개였다. 고장이 발생한 정확한 시점을 알 수 없는 대신에 설치된 후 고장이 발생한 시점의 사용 구간에 대한 자료를 수집할 수 있었다. 사용 구간별 고장 개수와 중도절단 개수에 대한 정보는 Table 1과 같다.

Table 1의 고장 자료만을 대상으로 이 자료에 가장 적합한 분포인 2-모수 와이블 분포, 분포적합 및 모수 추정에는 최우추정법과 카플란-마이어 방법을 사용하여 식 (6)의 2-모수 와이블 분포의 확률밀도함수( $f(t)$ )에 대한 모수를 추정하면  $\eta$ 는 6.2312이고,  $\beta$ 는 2.4554이 된다. 식 (7)을 이용하여 평균수명(MTTF)을 구하면 5.52년이 된다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (6)$$

여기서,  $\eta$ 는 척도 모수(Scale parameter),  $\beta$ 는 형상 모수(Shape parameter)를 의미한다.

$$MTTF = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt \quad (7)$$

다른 한편, Table 1의 고장 자료와 중도절단 자료 전체를 대상으로 가장 적합한 분포인 로그로지스틱 분포와 고장 자료의 분석과 동일한 방법으로 식 (8)의 로그로지스틱 분포

의 확률밀도함수( $f(t)$ )에 대한 모수를 추정하면  $\mu$ 는 2.9054 이고,  $\sigma$ 는 0.4471이 된다. 식 (7)을 이용하여 평균수명(MTF)을 구하면 26.02년이 된다.

$$f(t) = \frac{e^{-z}}{\sigma(1+e^z)^2} \quad (8)$$

$$z = \frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}$$

여기서,  $\mu$ 는 척도 모수,  $\sigma$ 는 형상 모수를 의미한다. 전자와 후자 각각의 확률밀도함수를 한 개의 플롯으로 나타내면 Fig. 2와 같으며, 분석은 수명자료 분석 전용 소프트웨어인 Weibull++ v8을 사용하였다. 전자의 경우는 고장 자료만을 이용하여 분석하였기 때문에 확률밀도함수가 왼쪽에 위치하고, 후자의 경우는 고장 및 중도절단 자료 모두를 이용하여 분석하였기 때문에 오른쪽에 위치하게 된다. 결국 단말장치의 실제 수명분포는 이 두 개의 확률밀도함수 사이에 존재하게 될 것이다.

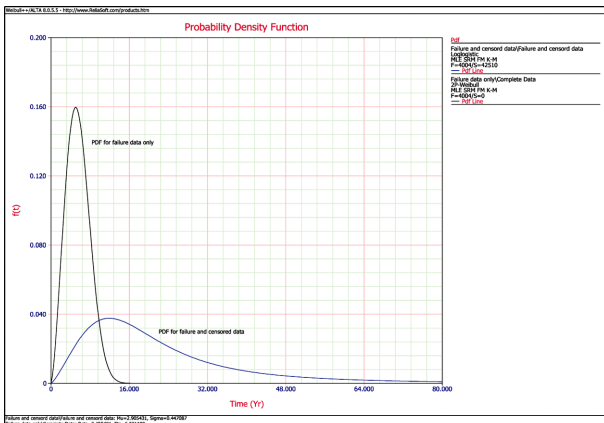


Fig. 2 PDF for failure data only vs. PDF for failure and censored data

단말장치에 대한 고장 자료와 샘플링 비율별 중도절단 자료를 대상으로 최적분포인 로그로지스틱 분포를 가정하여 수명분포를 추정한다. 그런 다음, 사용 구간별 총 수량을 기준으로 고장 날 확률인 불신뢰도(Unreliability) 함수에 대한 조건부 확률을 이용하여 12년 동안에 일어날 수 있는 고장 개수를 추정한다. 그리고 경험적으로 수명을 15년 정도로 알고 있기 때문에 관측한 고장과 중도절단 자료로부터 구한 최적 수명분포인 로그로지스틱 분포로 가정하고 모수를 구한 다음, 조건부 확률을 이용하여 12년 동안에 일어날 수 있는 고장 개수를 추정한다. 이러한 방법으로 표본 비율별로 평균계급오차(MSE)를 구한 결과는 Table 2와 같다.

### 3.2 중도절단 자료의 최적 샘플링 사례

단말장치에 대한 수명 분석 결과에서 알 수 있듯이 고장 자료만을 이용하여 수명을 분석하면 과소추정이 되고, 중도절단 자료 전체를 이용하면 과대추정이 된다. 이러한 문제

Table 2 MSE per sampling proportion for the terminal unit

Sampling ratio (%)	MSE
10	12.86113
20	5.153203
30	1.861881
40	0.194678
50	0.021384
60	0.121406
70	0.334125
80	0.581083
90	0.835514
100	1.077847

Table 3 Estimated failure ratio with 50% sampling

Number of use years	Estimated failure ratio (%)	Empirical failure ratio (%)
1	0.53	0.44
2	2.14	1.93
3	4.12	3.91
4	6.17	6.03
5	8.08	8.06
6	9.70	9.78
7	10.90	11.08
8	11.66	11.87
9	12.00	12.18
10	11.96	12.08
11	11.64	11.64
12	11.09	11.00

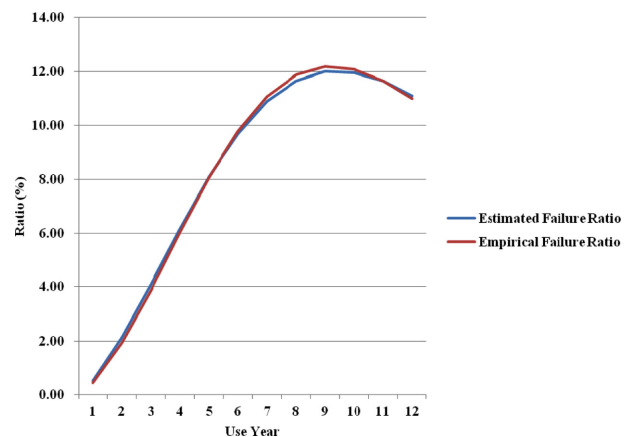


Fig. 3 Estimated failure ratio vs. empirical failure ratio

점을 해결하기 위해 제안한 최적 샘플링 추정절차에 따라 최적의 표본 비율을 결정하기 위한 기준으로 각 표본 비율별로 고장 자료를 이용하여 추정한 고장 개수에 대한 분포와 경험적으로 알고 있는 수명 분포를 이용하여 추정한 고장 개수에 대한 분포를 이용해 MSE를 계산하였다. Table 2의 결

과로부터 최소의 MSE를 갖는 표본 추출 비율이 50%일 때가 최적이라는 결론을 얻었다. 다시 말해 표본의 추출 비율이 50%일 때가 실제 분포와 가장 근접하다는 의미이다.

또한 중도절단 자료의 표본 중 50%를 추출한 후 추정할 수명분포를 기반으로 분석한 사용 연도별 고장 개수에 대한 추정 비율과 경험에 의한 수명분포를 기반으로 분석한 추정 비율은 Table 3과 같다. Table 3의 사용연도별 비율을 Fig. 3과 같이 도표로 나타내보면 서로 매우 근사함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 예방정비 최적화를 위한 중도절단 자료의 최적 샘플링 방법에 대해 제시하고, 실례를 소개하였다. 예방정비 정책을 수립하거나 수립된 정책을 이행하는 동안에 현장의 고장 및 정비 이력 자료를 수집하여 신뢰성 분석을 할 때 중도절단 자료의 샘플링 비율에 따라 실제 결과와 상이한 신뢰성 추정 결과를 얻을 수 있다. 수명이 10여 년 이상이 되는 제품의 경우 과거 데이터의 보관 절차나 관리방법의 문제로 고장이력 정보가 없거나 새로운 제품의 경우 수명주기 전체에 대한 고장 자료가 없고 초기 고장 자료만을 이용하여 분석할 경우에는 과소추정이 될 수 있고, 많은 수의 중도절단 자료를 활용할 경우에는 과대추정이 되어 실제 수명과 상당한 오차가 존재할 수 있다. 이에 대한 해결 방안으로 분포 적합 방법은 초기 고장 자료 전체를 활용하여 분석을 하고, 중도절단 자료의 경우에는 최적 샘플링을 위한 추정 절차에 따라 추정한 후 초기 고장 자료와 함께 신뢰성 분석에 사용하는 것이다.

중도절단 비율의 최적 샘플링 실증 사례의 경우, 개폐용 단말장치의 평균수명은 일반적으로 15여 년 정도로 알려져 있다. A사의 경우 현재 현장에 설치된 개폐용 단말장치는 약 42,000여 개로 최근 10여 년간 발생한 고장 건수는 전체의 약 10% 정도였다. 이 고장 자료만을 기반으로 2-모수 와이블 분포를 적용하여 추정된 평균수명은 5.52년 정도였다. 반면에 고장 자료와 중도절단 자료 전체를 기반으로 로그로지스틱 분포로 수명을 추정된 결과는 26.02년으로 경험적으로 예상하는 수명보다 약 두 배 정도 크게 나타났다. 이러한 문제에 대한 해결책으로 제안한 최적 샘플링 추정 절차를 적용할 때 전체 중도절단 자료 중에서 표본비율이 50%일 경우가 실제 분포와 가장 근접함을 알 수 있었다.

RCM(Reliability Centered Maintenance) 분석 과정에서 신뢰성 분석을 통해 얻은 정보는 정비 기술에 기반이 되며 정비 정책 결정을 위한 기초 자료로 매우 중요한 역할을 한다. 그렇기 때문에 향후 TWC(Train to Wayside Communication)를 개발하여 적용하면서 서론에서 언급한 동일한 문제에 직면할 경우, 본 논문에서 제시한 방법으로 중도절단 자료에 대한 최적 샘플링 방법을 활용하면 최적의 정비 정책을 수립할 수 있으므로 제품의 신뢰성 향상이나 유지보수의 최적화로 인한 비용 절감 등의 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 후 기

본 논문의 일부는 2012년도 광운대학교 연구년 지원으로 수행되었습니다. 본 논문의 일부는 2012년도 국토교통부 건설교통 기술촉진사업의 지원(12PRTD-C063974-01)으로 수행되었습니다.

#### References

- [1] NAVSEA (2007) Reliability-Centered Maintenance (RCM) Handbook, Naval Sea Systems Command, Washington D.C., USA, pp. 1-1.
- [2] Hoang Pham (2003) Handbook of Reliability Engineering, Springer-Verlag London Limited, New York, USA, pp. 480-483.
- [3] Robert B. Abernethy (1998) The New Weibull Handbook, Robert B. Abernethy, Florida, USA, pp. 2-8.
- [4] ReliaSoft (2012) Reliability synthesis elements, ReliaSoft Corp., Arizona, USA, pp. 57-66.
- [5] IAEA (2007) Application of Reliability Centred Maintenance to Optimize Operation and Maintenance in Nuclear Power Plants, IAEA, Vienna, Austria, pp. 5-18.
- [6] Smith Anthony (2004) RCM-Gateway to World Class Maintenance, Elsevier Butterworth-Heinemann, Massachusetts, USA, pp. 19-37.
- [7] E.L. Kaplan, Paul Meier (1958) Nonparametric Estimation from Incomplete Observations, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 53, pp. 457-481.
- [8] L.M. Leemis (1995) Reliability, Probabilistic Models and Statistical Methods, Prentice-Hall International, Inc., London, UK, pp. 78-94.
- [9] I.H. Lee, D.H. Kim, M.H. Kim, J.W. Seo, et al. (2011) A Study on the Existing State of Preventive Maintenance and the Improvement Measures for a Point Machine, *Proceedings of The Korean Society for Railway Spring Conference*, Gangwon-do, Korea, pp. 1174-1181.
- [10] B.O. Lim, D.G. Yoon (2005) A Study on the Application of RCM (Reliability Centered Maintenance) to KTX (Korea Train eXpress), *Journal of The Korean Society for Railway*, 8(5), pp. 470-476.

접수일(2013년 2월 20일), 수정일(2013년 4월 15일),  
게재확정일(2013년 5월 7일)

**In-hyun Lee** : ian.lee@tuv-sud.kr

Department of Control and Instrumentation Engineering, Kwang-woon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul, 139-701, Korea

**Sea-hwa Oh** : seahwa.oh@doosan.com

Department of Control and Instrumentation Engineering, Kwang-woon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul, 139-701, Korea

**Chang-long Li** : long\_kw@kw.ac.kr

Department of Control and Instrumentation Engineering, Kwang-  
woon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul, 139-701,  
Korea

**Dong-in Yang** : ydi60@korea.kr

Department of Control and Instrumentation Engineering, Kwang-  
woon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul, 139-701,  
Korea

**Key-seo Lee** : kslee@kw.ac.kr

Department of Control and Instrumentation Engineering, Kwang-  
woon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul, 139-701,  
Korea