

지수분포 특성을 갖는 NHPP 소프트웨어 신뢰성 모형의 성능 비교 분석

박승규*

Comparative Analysis on the Performance of NHPP Software Reliability Model with Exponential Distribution Characteristics

Seung-Kyu Park*

요 약

본 연구에서는 지수 형태의 분포(Exponential Basic, Inverse Exponential, Lindley, Rayleigh) 특성을 갖는 NHPP 소프트웨어 신뢰성 모형의 성능을 비교 분석하였고, 이를 근거로 최적의 신뢰성 모형도 함께 제시하였다. 소프트웨어 고장 현상을 분석하기 위하여 시스템 운영 중 수집된 고장 시간 데이터를 사용하였고, 모수 추정에는 최우 추정법을 적용하여 해결하였다. 다양한 비교 분석(평균제곱오차(MSE) 분석, 평균값 함수의 참값 예측력 분석, 강도 함수의 평가, 임무 시간을 적용한 신뢰도를 평가)을 통하여 Lindley 모형이 가장 우수한 성능을 가진 효율적인 모형임을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 기존 연구사례가 없는 지수 형태의 특성을 갖는 분포의 신뢰도 성능을 새롭게 파악하였고, 이를 통하여 소프트웨어 개발자들이 초기 단계에서 활용할 수 있는 기본적인 설계 데이터를 제시할 수 있었다.

ABSTRACT

In this study, the performance of the NHPP software reliability model with exponential distribution (Exponential Basic, Inverse Exponential, Lindley, Rayleigh) characteristics was comparatively analyzed, and based on this, the optimal reliability model was also presented. To analyze the software failure phenomenon, the failure time data collected during system operation was used, and the parameter estimation was solved by applying the maximum likelihood estimation method (MLE). Through various comparative analysis (mean square error analysis, true value predictive power analysis of average value function, strength function evaluation, and reliability evaluation applied with mission time), it was found that the Lindley model was an efficient model with the best performance. Through this study, the reliability performance of the distribution with the characteristic of the exponential form, which has no existing research case, was newly identified, and through this, basic design data that software developers could use in the initial stage can be presented.

키워드

Exponential Distribution(Exponential Basic, Inverse Exponential, Lindley, Rayleigh), NHPP, Reliability Performance.
지수 형태의 분포(Exponential Basic, Inverse Exponential, Lindley, Rayleigh), 비동질 포아송 과정, 신뢰도 성능

* 남서울대학교 조교수(skpark@nsu.ac.kr)
* 교신저자 : 남서울대학교 전자공학과
• 접수일 : 2022. 06. 11
• 수정완료일 : 2022. 07. 12
• 게재확정일 : 2022. 08. 17

• Received : Jun. 11, 2022, Revised : Jul. 12, 2022, Accepted : Aug. 17, 2022
• Corresponding Author : Seung-Kyu Park
Dept. Electronic Engineering, Namseoul University, Email : skpark@nsu.ac.kr

1. 서 론

최근 4차 산업혁명의 급격한 도래와 함께 소프트웨어 융복합 기술의 확산으로 소프트웨어 시스템의 규모는 끊임없이 확장하고 복잡해지고 있다. 이런 이유로, 대용량의 빅데이터를 고장 없이 정확히 처리할 수 있는 신뢰성 연구에 대한 필요성은 더욱 가중되고 있다. 따라서, 소프트웨어 신뢰성을 높여서 소프트웨어의 품질을 개선하고자 신뢰성 분야에 많은 연구와 투자가 이루어져 왔다[1]. 지금까지, 소프트웨어의 신뢰성을 분석하기 위해 제어된 테스트 환경 내에서 강도 함수와 평균값 함수에 근거한 비동질 포아송 과정(Non-homogeneous Poisson Process; NHPP)을 이용한 신뢰성 모형이 많이 제안되어왔다[2]. Xiao and Dohi[3]는 적합도 테스트 및 예측 분석을 통해 소프트웨어 신뢰성 모델링에서 Weibull 유형 분포의 효율성을 분석하였고, Huang[4]은 평균값 함수를 사용하여 소프트웨어 신뢰성 속성을 설명하였다. 더불어, Kim[5]은 레일리 분포를 사용하여 무한 고장 NHPP 소프트웨어 신뢰성 모형을 가지고 신뢰도 요인을 분석하기도 하였다. 또한, Yang[6]은 와이블 수명분포에 근거하여 NHPP 신뢰성 모형의 성능을 분석하여 평가하였고, 지수 타입 수명분포에 근거하여 NHPP 소프트웨어 개발 모형의 비용에 관한 속성을 비교 분석하기도 하였다[7].

따라서, 본 연구에서는 신뢰성 테스트 분야에 많이 사용하는 지수 형태의 분포(Exponential Basic, Inverse Exponential, Lindley, Rayleigh)을 선정하여 NHPP 소프트웨어 신뢰성 모형의 성능을 새롭게 비교, 분석하였다. 이와 함께, 소프트웨어 개발자들이 최적의 모형을 탐색하기 위한 새로운 설계 정보도 제시하고자 한다.

II. 관련 연구 및 기술

2.1 NHPP 소프트웨어 신뢰성 모형

NHPP 소프트웨어 신뢰성 모형은 단위 시간당 발생하는 소프트웨어의 고장 발생의 횟수를 기준으로

평균값 함수와 강도 함수를 이용해서 신뢰도를 테스트하는 확률 예측형 모형이다.

NHPP 모형에서 소프트웨어 고장의 누적수를 $N(t)$, 평균값 함수(Mean Value Function)를 $m(t)$, 강도 함수(Intensity Function)를 $\lambda(t)$ 라고 하면, 고장 수 $N(t)$ 는 모수 $m(t)$ 와 $\lambda(t)$ 을 가진 포아송 확률밀도함수(Probability Density Function)를 따른다고 하였다.

$$P\{N(t) = n\} = \frac{[m(t)]^n \cdot e^{-m(t)}}{n!} \quad (1)$$

단, $n = 0, 1, 2 \dots \infty$

여기서, NHPP 모형의 고장 발생 기댓값인 평균값 함수 $m(t)$ 와 고장 발생률을 나타내는 강도 함수 $\lambda(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$m(t) = \int_0^t \lambda(s) ds \quad (2)$$

$$\frac{dm(t)}{dt} = \lambda(t) \quad (3)$$

본 연구에서는 소프트웨어의 고장을 수리하는 동안에는 고장이 발생하지 않는다고 가정하는 유한 고장(Finite Failure)을 기반으로 분석하고자 한다.

따라서, 유한 고장 NHPP 모형에서 측정 시간 t 까지 발견될 수 있는 고장의 기댓값을 θ , 확률밀도함수를 $f(t)$, 누적분포함수를 $F(t)$ 라고 하면, 평균값 함수와 강도 함수는 다음과 같다[8].

$$m(t) = \theta \cdot F(t) \quad (4)$$

$$\lambda(t) = \theta \cdot F(t)' = \theta \cdot f(t) \quad (5)$$

식(4)와 식(5)를 이용하면, NHPP 모형의 우도 함수(Likelihood Function)는 다음과 같이 정리된다.

$$L_{NHPP}(\theta | \underline{x}) = \left(\prod_{i=1}^n \lambda(x_i) \right) \exp[-m(x_n)] \quad (6)$$

$$\text{단, } \underline{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

2.2 NHPP Exponential Basic 모형

Exponential Basic 모형은 지수 분포 특성을 갖는 기본 모형으로서 신뢰도 테스트 분야에서 가장 널리 알려져 있으며, 대표적인 것이 Goel-Okumoto 모형이다. Goel-Okumoto 모형에서 고장 발생의 기댓값을 θ 라 하면, 평균값 함수와 강도 함수는 다음과 같다[9].

$$m(t|\theta, b) = \theta (1 - e^{-bt}) \quad (7)$$

$$\lambda(t|\theta, b) = \theta b e^{-bt} \quad (8)$$

식(7)과 식(8)을 식(6)에 대입하여 정리하면 NHPP Exponential Basic 모형의 우도 함수는 다음과 같다.

$$L(\theta, b | \underline{x}) = \left(\prod_{i=1}^n \theta b e^{-bx_i} \right) \exp[-\theta(1 - e^{-bx_n})] \quad (9)$$

단, $\underline{x} = (0 \leq x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n)$

식(9)에서 양변에 로그를 취하여 정리하면 로그 우도 함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ln L_{NHPP}(\Theta | \underline{x}) = n \ln \theta + n \ln b - b \sum_{k=1}^n x_k - \theta(1 - e^{-bx_n}) \quad (10)$$

따라서, 식(10)을 각각 파라미터 θ 와 b 로 편 미분하면 식(11)과 식(12)를 만족하는 최우 추정량 $\hat{\theta}_{MLE}$ 와 \hat{b}_{MLE} 를 이분법으로 구할 수 있다.

$$\frac{n}{\theta} = 1 - \exp(-\hat{b} x_n), \quad (11)$$

$$\frac{n}{b} = \sum_{i=1}^n x_n + \hat{\theta} x_n \exp(-\hat{b} x_n) \quad (12)$$

2.3 NHPP Inverse Exponential 모형

Inverse Weibull Distribution은 지수 분포 특성을 갖는 분포로써 신뢰성 및 의료 분야에서 널리 적용된다고 알려져 있다. NHPP Inverse Exponential 모형의 로그 우도 함수는 다음과 같이 정리할 수 있다[10].

$$\ln L_{NHPP}(\Theta | \underline{x}) = n \ln \theta - n \ln b - 2 \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n (bx_i)^{-1} - \hat{\theta} e^{-(bx_n)^{-1}} = 0 \quad (13)$$

여기서, 식(13)을 파라미터 θ 와 b 로 각각 편미분하면 식(14) 및 식(15)와 같이 정리되고, 이식을 만족하는 최우 추정량 $\hat{\theta}_{MLE}$ 와 \hat{b}_{MLE} 는 이분법으로 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\Theta | \underline{x})}{\partial \theta} = \frac{n}{\hat{\theta}} - e^{-(\hat{b} x_n)^{-1}} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\Theta | \underline{x})}{\partial b} = \frac{n}{\hat{b}} + \frac{n}{\hat{b}^2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} - \theta \frac{1}{\hat{b}^2 x_n} - e^{-(\hat{b} x_n)^{-1}} = 0 \quad (15)$$

단, $\underline{x} = (x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$

2.4 NHPP Lindley 모형

Lindley분포는 지수 분포 특성을 갖고, 신뢰도 수명 테스트 분야에서 널리 사용되는 분포이다. NHPP Lindley 모형의 우도 함수는 다음과 같다[11].

$$L_{NHPP}(\Theta | \underline{x}) = \left[\prod_{i=1}^n \theta \frac{b^2}{b+1} (1+t) e^{-bt} \right] \cdot \exp \left[-\theta \left(1 - \frac{b+1+bt}{b+1} e^{-bt} \right) \right] \quad (16)$$

식(16)의 양변에 로그를 취하면, 최우 추정을 위한 로그 우도 함수는 식(17)과 같이 정리 된다.

$$\ln L_{NHPP}(\Theta | \underline{x}) = -\theta \left[1 - \left(\frac{b+1+bt}{b+1} \right) \times e^{-bt} \right] + n \ln \theta + 2n \ln b - n \ln(b+1) + \sum_{i=1}^n (1+x_i) - b \sum_{i=1}^n x_i \quad (17)$$

또한, 식(17)을 파라미터 θ 와 b 로 각각 편 미분하면, 식(18) 및 식(19)와 같이 정리되고, 이 식을 만족하는 최우 추정량 $\hat{\theta}_{MLE}$ 와 \hat{b}_{MLE} 는 이분법으로 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\Theta | \underline{x})}{\partial \theta} = \frac{n}{\theta} - \left[1 - \left(\frac{b+1+bt}{b+1} \right) \times e^{-bt} \right] = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\Theta | \underline{x})}{\partial b} = \frac{2n}{b} - \frac{n}{b+1} - \sum_{i=1}^n x_i - \theta e^{-bx_n} (x_n - b^2 x_n^2 + b - b^3 x_n^3 - b^3) = 0 \quad (19)$$

2.5 NHPP Rayleigh 모형

Rayleigh 분포는 지수 분포 특성을 가지며, 신뢰도 수명 테스트 및 측정에 적합한 Weibull 분포로도 널

리 알려져 있다. 최우 추정을 위한 NHPP Rayleigh 모형의 로그 우도 함수는 다음과 같이 정리할 수 있다[12].

$$\ln L_{NHPP}(\Theta|\underline{x}) = n \ln 2 + n \ln \theta + n \ln b + \sum_{i=1}^n \ln x_i - b \sum_{i=1}^n x_i^2 - \theta (1 - e^{-bx_n^2}) \quad (20)$$

여기서, 식(20)을 파라미터 Θ 와 b 로 각각 편미분하면, 식(21) 및 식(22)와 같이 정리되고, 이 식을 만족하는 최우 추정량 $\hat{\theta}_{MLE}$ 와 \hat{b}_{MLE} 는 다음과 같이 이분법으로 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\Theta|\underline{x})}{\partial \theta} = \frac{n}{\theta} - 1 + e^{-\hat{b}x_n^2} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\Theta|\underline{x})}{\partial b} = \frac{n}{\hat{b}} - \sum_{i=1}^n x_i^2 - \hat{\theta} x_n^2 e^{-\hat{b}x_n^2} = 0 \quad (22)$$

단, $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$

III. 소프트웨어 고장시간을 이용한 신뢰도 성능분석

본 연구에서는 표 1과 같이 시스템 운영 중에 수집된 소프트웨어 고장 시간 데이터[13] (Software Failure Time Data)를 이용하여 제안된 모형의 신뢰도 성능을 비교, 분석하였다. 본 데이터는 187.35시간 동안 30번 고장이 발생하여 수집된 자료이다.

표 1. 수집된 소프트웨어 고장 시간 데이터
Table 1. Collected software failure time data

Failure number	Failure time(hours)	Failure time(hours) × 10 ⁻¹
1	4.79	0.479
2	7.45	0.745
3	10.22	1.022
4	15.76	1.576
5	26.10	2.610
6	35.59	3.559
7	42.52	4.252
8	48.49	4.849
9	49.66	4.966
10	51.36	5.136
11	52.53	5.253
12	65.27	6.527

13	69.96	6.996
14	81.70	8.170
15	88.63	8.863
16	107.71	10.771
17	109.06	10.906
18	111.83	11.183
19	117.79	11.779
20	125.36	12.536
21	129.73	12.973
22	152.03	15.203
23	156.40	15.640
24	159.80	15.980
25	163.85	16.385
26	169.60	16.960
27	172.37	17.237
28	176.00	17.600
29	181.22	18.122
30	187.35	18.735

표 1과 같이 수집된 고장 시간 데이터를 본 연구의 신뢰도 분석에 적용 가능한지를 확인하기 위하여, 그림 1과 같이 라플라스 추세 테스트(Laplace Trend Test) 방법으로 시뮬레이션하였다[14].

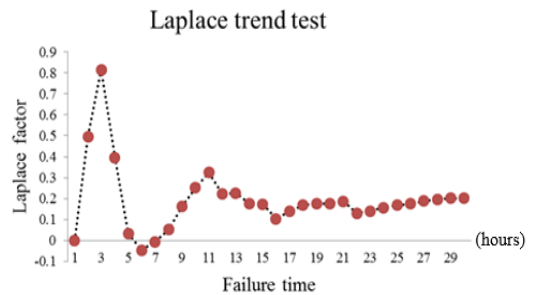


그림 1. 라플라스 추세검정의 시뮬레이션 결과
Fig. 1 Simulation results of laplace test

일반적으로, 라플라스 추세검정의 테스트 결과 적용된 자료가 “-2와 2”사이에 분포되어 있으면, 극단값이 존재하지 않으므로, 해당 자료는 안정적이기 때문에 신뢰도 분석에 적용할 수 있다고 한다[8].

그림 1에서 테스트 결과, 라플라스 요인(Factor)의 결과값이 “-2와 2사이에 분포”하였기 때문에, 극단값이 존재하지 않는다. 따라서, 이 고장시간 데이터는 안정적이며, 신뢰할 수 있으므로 본 연구에 적용할 수 있다.

또한, 본 연구에서 제안된 NHPP 신뢰성 모형의 파라미터 ($\hat{\theta}$, \hat{b})의 추정에는 최우 추정법(maximum likelihood estimation method, MLE)을 적용하여 계산하였고, 그 결과는 표 2와 같다.

표 2. 각 모형에 대한 모수추정
Table 2. Parameter estimation of each model

NHPP Model	MLE		MSE
	$\hat{\theta}$	\hat{b}	
Exponential Basic	32.9261	0.1297	32.9379
Inverse Exponential	41.2881	0.1692	20.2035
Lindley	37.8877	0.1497	4.618
Rayleigh	30.0412	0.0188	32.1798

표 2에서 평균 제곱 오차(MSE)는 실제 측정값과 예측값에 대한 오차를 측정하는 척도이며, 효율적인 모형 선정을 위한 판단 기준으로 사용된다. 따라서, 모형 선택에 있어서 실제 관찰값과 예측값에 대한 오차(Error)를 나타내는 평균 제곱 오차(MSE)값이 작을수록 효율적인 모형이라고 할 수 있다[15].

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (m(x_i) - \hat{m}(x_i))^2}{n - k} \quad (23)$$

여기서, $\hat{m}(x_i)$ 는 x_i 시점까지 평균값 함수에서 추정된 누적 고장의 개수이고, n 은 적용된 고장의 개수이며, k 는 사용된 파라미터의 개수를 나타낸다.

또한, [그림 2]는 전체 고장수(30개)에 따른 평균 제곱 오차(MSE)의 패턴 추이(Pattern Transition)을 보여주고 있다. 즉, 전체 고장 범위에서 제안된 모형 중에 Lindley 모형이 가장 작은 오차 값을 가지고 있어서 우수한 모형임을 알 수 있다. 또한, Rayleigh 모형도 평균 제곱 오차가 비교적 작게 분포하는 추이를 보이고 있어, 적합도의 관점에서 역시 효율적이라고 할 수 있다[16].

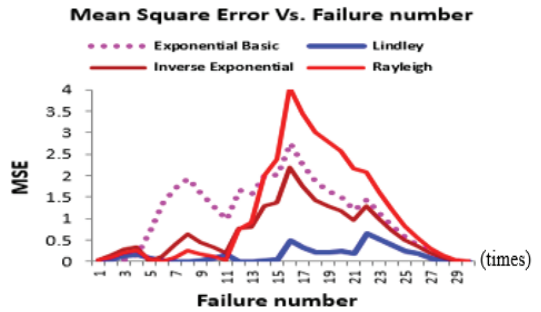


그림 2. 평균 제곱 오차의 추이 분석
Fig. 2 Transition analysis of mean square error

또한, 그림 3은 순시 고장(Instantaneous Failure)의 발생 강도를 나타내는 강도 함수에 대한 추이를 나타내고 있다. Lindley 모형과 Rayleigh 모형은 실제 고장 현상과 같이 초기에는 고장률이 크게 증가한 후, 고장 시간이 지나감에 따라 점점 감소하는 추이를 나타내어 신뢰성 모형의 적합도 측면에서 효율적임을 나타내고 있다. 반면에, Exponential Basic 모형은 강도 함수가 감소만 하는 패턴을 보이고 있어서, 적합도 측면에서는 비효율적임을 알 수 있다.

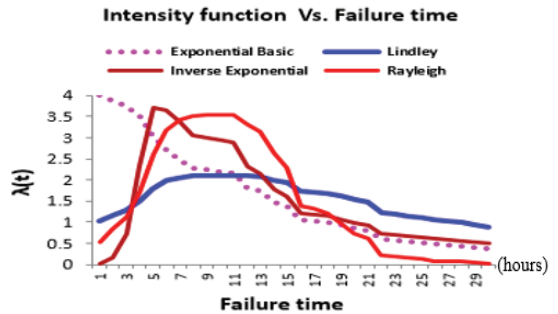


그림 3. 강도함수의 추이 분석
Fig. 3 Transition analysis of intensity function

그림 4는 참값(Real Value)을 예측하고 추정하는 능력을 나타내는 평균값 함수에 대한 추이를 나타내고 있다[17]. 이 시뮬레이션에서 Lindley 모형이 제안된 모형 중 참값에 대하여 가장 작은 에러 추정을 보이며 따라서, 가장 우수한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

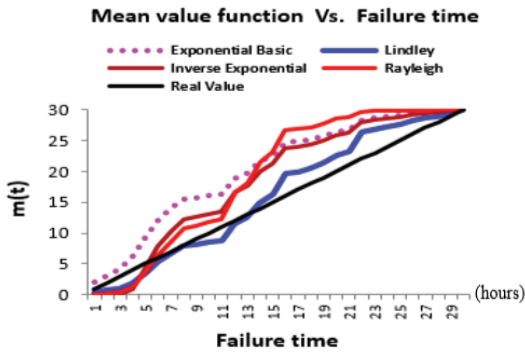


그림 4. 평균값 함수의 추이 분석
Fig. 4 Transition analysis of mean value function

또한, 제안된 모형에게 임무 시간을 투입한 후, 미래의 신뢰도 성능을 예측하고, 평가해 보자. 여기서, 신뢰도는 테스트 시점 $x_n = 187.35 \times 10^{-1}$ 에서는 고장이 발생하고, 신뢰구간 $(x_n, x_n + \tau)$ (단, τ 는 임무시간) 사이에서는 고장이 발생하지 않을 확률을 의미한다. 따라서, 신뢰도 $\hat{R}(\tau | x_n)$ 는 다음과 같이 정의된다 [18].

$$\begin{aligned} \hat{R}(\tau | x_n) &= e^{-\int_{x_n}^{x_n+\tau} \lambda(\tau) d\tau} \\ &= \exp[-\{m(\tau + x_n) - m(x_n)\}] \end{aligned} \quad (24)$$

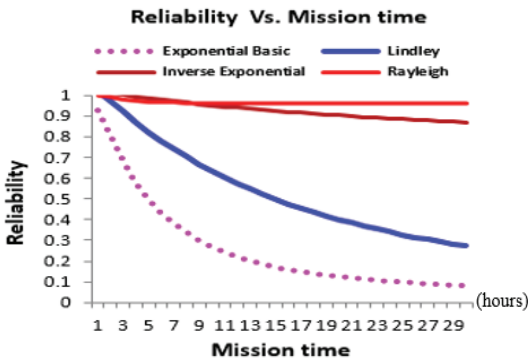


그림 5. 신뢰도의 추이 분석
Fig. 5 Transition analysis of reliability

그림 5와 같이 투입한 미래의 임무 시간에 대한 신뢰도 추이 분석 결과, 시간이 흐를수록 신뢰도가 감소

하는 Exponential Basic 모형은 비효율적이라 할 수 있지만, Rayleigh 모형과 Inverse Exponential 모형은 신뢰도 측면에서 높고 안정적인 추이를 나타내고 있어서 효율적이라 판단할 수 있다.

IV. 결론 및 향후 연구과제

소프트웨어 개발자는 소프트웨어 테스트 작업이나 개발 단계에서 고장 시간 데이터를 이용하여, 고장 발생의 신뢰도 속성을 정량적으로 모델링 한 후, 해당 속성을 이루는 요인들을 분석할 수 있다면, 신뢰도 성능도 함께 효율적으로 평가할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 소프트웨어 신뢰도 테스트 분야에 널리 사용되는 지수 형태의 분포들을 선정한 후, NHPP 신뢰성 모형에 적용하여, 제안된 모형의 성능을 비교, 분석하였고, 분석한 결과를 근거로 최적의 신뢰성 모형도 함께 제시하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

첫째, 효율적인 모형을 선정하는 기준인 평균제곱오차 (MSE)의 분석에서, 제안된 모형 중 Lindley 모형의 오차 값이 가장 작아서 효율적이었다.

둘째, 평균값 함수의 참값에 대한 예측력 분석에서, 제안된 모형들은 모두 과대평가된 패턴을 보였으나, Lindley 모형이 제안된 모형 중 오차의 폭이 가장 작아서, 신뢰도 성능이 가장 우수함을 알 수 있었다.

셋째, 고장 발생의 강도를 나타내는 강도 함수의 평가에서 Lindley 모형과 Rayleigh 모형은 초기 단계에서 고장 발생률이 크게 증가하다가 고장 시간이 흐를수록 점점 감소하는 추세를 보여서 신뢰성 모형의 적합도 측면에서 효율적이었다. 하지만, Exponential Basic 모형은 반대로 지속적으로 감소만 하는 비효율성을 보였다.

넷째, 미래의 임무 시간을 투입한 신뢰도를 분석한 결과, Rayleigh 모형은 가장 높고, 안정적인 추세를 보여 효율적이었으나, 반대로 Exponential Basic 모형은 임무 시간이 흐를수록 신뢰도가 지속적으로 감소하는 비효율성을 보였다.

이러한 연구 자료를 종합적으로 분석한 결과,

Lindley 모형이 제안된 지수 분포 모형 중 가장 우수한 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

결론적으로, 기존 연구사례가 없는 지수 분포 특성을 갖는 NHPP 신뢰성 모형의 성능에 관한 새로운 분석과 함께, 개발자들이 초기 신뢰도 테스트 단계에서 활용할 수 있는 기본적인 설계 데이터를 제시할 수 있었다. 더불어 향후에는, 적용된 고장 시간 데이터를 가지고 좀 더 다양한 지수 분포에 적용하여 최적의 소프트웨어 신뢰성 모형을 찾는 연구과제가 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

- [1] K. Y. Song, I. H. Chang, H. Pham, "A Software Reliability Model with a Weibull Fault Detection Rate Function Subject to Operating Environments," *Applied Science*, vol. 7, no. 983, pp.1-16, 2017.
- [2] H. Pham, "Distribution Function and its Application in Software Reliability," *International Journal of Performability Engineering*, vol. 15, no. 5, pp. 1306-1313. 2019.
- [3] X. Xiao, T. dohi "On the Role of Weibull-type Distribution in NHPP-based Software Reliability Modelling," *International Journal of Performability Engineering*, vol. 9, Issue. 2, pp.123-132, 2013.
- [4] C. Y. Huang, "Performance analysis of software reliability growth models with testing-effort and change-point," *Journal of Systems and Software*, vol.76, no.2, pp.181-194, 2005.
- [5] H. C. Kim, "The Comparative Study for Statistical Process Control of Software Reliability Model on Finite and Infinite NHPP using Rayleigh Distribution," *International Journal of Soft Computing*, vol. 11, no. 3, pp. 165-171. 2016.
- [6] T. J. Yang, "A study on the Reliability Performance analysis of finite failure NHPP software reliability model based on Weibull life distribution," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 12, no. 11, pp.1890-1896. 2019.
- [7] T. J. Yang, "Comparative study on the attributes analysis of software development cost model based on exponential-type lifetime distribution," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 11, no. 10, pp. 166-176, 2021.
- [8] T. J. Yang, "The Comparative Study of NHPP Software Reliability Model Based on Log and Exponential Power Intensity Function," *The Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, vol.8, no.6, pp.445-452, 2015.
- [9] Ye Zhang, and Kaigui Wu, "Software Cost Model Considering Reliability and Time of Software in Use," *Journal of Convergence Information Technology*, vol.7, no.13, pp.135-142, 2012.
- [10] T. J. Yang, "A Comparative Study on Reliability Attributes of Software Reliability Model Based on Type-2 Gumbel and Erlang Life Distribution," *ARNP Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 14, no. 10, pp. 3366-3370. 2019.
- [11] H.C. Kim, "The Property of Learning effect based on Delayed Software S-Shaped Reliability Model using Finite NHPP Software Cost Model," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 34, pp. 1-7, 2015.
- [12] H. J. Jung, "A proposal of Software Quality Measurement Model and Testcase on the basis of ISO/IEC 25," *The Journal of KIIT*, vol. 9, no. 10, pp. 197-205, 2011.
- [13] Y. Hayakawa, G. Telfar "Mixed poisson-type processes with application in software are reliability," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 31, pp.1 51-156, 2000.

- [14] E. K, Kim, "Development of a multi-tool carving machine and a machine control software," *The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, Issue. 4, pp. 755-760, 2019.
- [15] S. U. Lee and M, B, Choi, "An Establishment of the Process System for Software Requirements Engineering," *The Journal of IIBC*, vol. 14, no. 1, pp. 37-49, 2014.
DOI : <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2014.14.1.37>
- [16] M. H. Cho, "A Study on the Direction of Modeling Techniques for the Development of Large Scale Software," *The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, Issue. 1, pp. 167-172, 2020.
- [17] E. K, Kim, "Development of Software Education Products Based on Physical Computing," *The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, Issue. 3, pp. 595-600, 2019.
- [18] H. C. Kim and H. K, Park, "The Comparative Study of Software Optimal Release Time Based on Weibull Distribution Property," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 10, Issue. 8, pp. 1903-1901, 2009.
DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.8.1903>

저자 소개



박승규(Seung Kyu Park)

1989년 연세대학교 전기공학과
졸업(공학사)

1991년 연세대학교 대학원 전기
공학과 졸업(공학석사)

1996년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학
박사)

2017년~현재 남서울대학교 전자공학과 조교수

※ 관심분야 : 정보통신, 정보보안, 소프트웨어공학