

로그 및 지수파우어 강도함수를 이용한 NHPP 소프트웨어 무한고장 신뢰도 모형에 관한 비교연구

양태진*

The Comparative Study of NHPP Software Reliability Model Based on Log and Exponential Power Intensity Function

Tae-Jin Yang *

요약 소프트웨어 개발 과정에서 소프트웨어 신뢰성은 매우 중요한 이슈이다. 소프트웨어 고장분석을 위한 무한고장 비동질적인 포아송과정에서 결합당 고장발생률이 상수이거나, 단조 증가 또는 단조 감소하는 패턴을 가질 수 있다. 본 논문에서는 소프트웨어 신뢰성에 대한 적용 효율을 나타내는 로그 및 지수파우어 강도함수(로그 선형, 로그 파우어와 지수 파우어)로 신뢰성 모형을 제안한다. 효율적인 모형을 위해 평균제곱에러(MSE), 결정계수(R^2)에 근거한 모델선택, 최우추정법, 이분법에 사용된 파라미터를 평가하기 위한 알고리즘이 적용되었다. 제안하는 로그 및 지수파우어 강도함수를 위해 실제 데이터를 사용한 고장분석이 적용되었다. 고장데이터 분석은 로그 및 지수파우어 강도함수와 비교하였다. 데이터 신뢰성을 보장하기 위하여 라플라스 추세검정(Laplace trend test)을 사용하였다. 본 연구에 제안된 로그선형과 로그파우어 및 지수파우어 신뢰성모형도 신뢰성 측면에서 효율적이기 때문에 (결정계수가 70% 이상) 이 분야에서 기존 모형의 하나의 대안으로 사용할 수 있음을 확인 할 수 있었다. 이 연구를 통하여 소프트웨어 개발자들은 다양한 강도함수를 고려함으로써 소프트웨어 고장형태에 대한 사전지식을 파악하는데 도움을 줄 수 있으리라 사료 된다.

Abstract Software reliability in the software development process is an important issue. Software process improvement helps in finishing with reliable software product. Infinite failure NHPP software reliability models presented in the literature exhibit either constant, monotonic increasing or monotonic decreasing failure occurrence rates per fault. In this paper, proposes the reliability model with log and power intensity function (log linear, log power and exponential power), which made out efficiency application for software reliability. Algorithm to estimate the parameters used to maximum likelihood estimator and bisection method, model selection based on mean square error (MSE) and coefficient of determination(R^2), for the sake of efficient model, was employed. Analysis of failure, using real data set for the sake of proposing log and power intensity function, was employed. This analysis of failure data compared with log and power intensity function. In order to insurance for the reliability of data, Laplace trend test was employed. In this study, the log type model is also efficient in terms of reliability because it (the coefficient of determination is 70% or more) in the field of the conventional model can be used as an alternative could be confirmed. From this paper, software developers have to consider the growth model by prior knowledge of the software to identify failure modes which can be able to help.

Key Words : Software Reliability, Non-Homogeneous Poisson Process, Log, Power Intensity Function, Bisection method, MSE

This paper studies under a 2015 Namseoul University Academic Research Support

*Corresponding Author : Academic Cooperation Foundation(solomon645@nsu.ac.kr)

Received November 26, 2015

Revised December 5, 2015

Accepted December 12, 2015

1. 서론

소프트웨어 고장으로 인한 컴퓨터 시스템의 고장은 우리사회에 엄청난 손실을 유발할 수도 있다. 따라서 소프트웨어 개발과정에서 소프트웨어 신뢰성은 중요한 문제이다. 이 문제는 사용자의 요구조건과 테스트 비용을 만족시켜야 한다. 소프트웨어 테스트(디버깅)면에서 비용을 줄이기 위해서는 소프트웨어의 신뢰성의 변동과 테스트 비용을 사전에 알고 있어야 효율적이다. 따라서 신뢰도, 비용 및 방출시간의 고려사항을 가진 소프트웨어 개발과정은 필수 불가결하다. 결국 소프트웨어 제품의 결함내용을 예측하기 위한 모형 개발이 필요하다. 지금까지 많은 소프트웨어 신뢰성모형이 제안되었다. 이 중에서 비동질적 포아송 과정(Non-

Homogeneous Poisson Process ; NHPP)에 의존한 모형[1]은 예러 탐색과정 측면에서는 우수함 모형이고, 결함이 발생하면 즉시 제거되고 디버깅 과정에서 새로운 결함이 발생되지 않는다는 가정을 하고 있다.

Gokhale과 Trivedi[1]은 고양된 비동질적인 포아송 과정 모형(Enhanced NHPP) 모형을 제시하였고 Goel과 Okumoto[2]은 지수적 소프트웨어 신뢰성모형(Exponential software reliability growth model)을 제안 하였다. 이 모형은 결함의 누적수가 S-형태나 지수적 형태(S-shaped or exponential-shaped)를 가진 평균값함수(Mean value function)를 이용한 모형이다.

이러한 모형에 의존한 일반화모형은 Yamada와 Ohba[3]에 의해 지연된 S형태 신뢰 성장모형(Delayed S-shaped reliability growth model)과 변곡된 S 형태 신뢰 성장모형(Inflection S-shaped reliability growth model)이 제안되었다. Zhao[4]는 소프트웨어 신뢰도에서 변환점 문제를 제시하였고 Shyur[5]는 변환점을 이용한 일반화한 신뢰도 성장모형을 제안하였다. Pham와 Zhang[6]는 테스트 커버리지(Coverage)를 측정하여 소프트웨어 안정도를 평가 할 수 있는 소프트웨어 안정도 모형을 제시했다.

비교적 최근 Huang[7]은 일반화 로지스틱 테스트 노력함수(Generalized logistic testing-effort function)와 변환점 모수(Change-point parameter)를 통합하여 효율적인 소프트웨어 신뢰성을 예측하는 기술을 제시하기도 하였다. 그리고 최근에는 S-형태 모형은 소프트웨어 관리자들이 소프트웨어 및 검사도구에 익숙해지는 학습과정을 설명할 수 있다고 하였다[8]. 그리고 김희철[9]은 Rayleigh형과 Burr형 NHPP 소프트웨어 신뢰모형에 관한 통계적 공정관리 접근방법 비교연구 결과 레일리분포모형보다는 버르분포모형이 상대적으로 효율적 모형임을 확인하였다.

따라서 본 연구는 NHPP 모형에서 강도함수가 상수패턴을 가진 로그선형특성과 증가하다가 감소하는 형태를 가진 로그 파워어특성 그리고 증가패턴을 가진 지수 파워어특성 강도함수를 따르는 소프트웨어 신뢰도 모형을 비교 분석 하고자 한다.

2. 관련연구

2.1 NHPP 소프트웨어 신뢰성

$N(t)$ 을 시간 t 까지 검출된 소프트웨어의 누적 고장수라고 하고, $m(t)$ 를 이에 대한 기대값을 나타내는 평균값 함수(Mean Value Function)로 가정하고 $\lambda(t)$ 을 강도함수(Intensity function) (즉, t 에서의 순간 결함 검출율)이면 비동질 포아송 과정(NHPP)은 누적 고장수인 $N(t)$ 는 모수 $m(t)$ 을 가진 포아송 확률밀도함수 (Probability density function)로 알려져 있다. 즉,

$$P\{N(t) = n\} = \frac{[m(t)]^n \cdot e^{-m(t)}}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (1)$$

따라서, NHPP모형에서 평균값함수 $m(t)$ 와 강도함수 $\lambda(t)$ 는 다음과 같은 관계로 표현할 수 있다[1][9].

$$m(t) = \int_0^t \lambda(s) ds, \quad \frac{dm(t)}{dt} = \lambda(t) \quad (2)$$

이처럼 시간관련모형(Time domain models)들

은 NHPP에 의해서 확률고장과정으로 설명이 가능하다[1]. 이러한 NHPP모형들은 유한고장모형과 무한고장 범주로 분류한다[1]. 유한고장 NHPP모형에서는 시간 $(0, t]$ 까지 탐색되어 질 수 있는 결함의 기대값을 θ 라고 표현하면 유한고장 NHPP 모형의 평균값 함수와 강도함수는 다음과 같이 표현할 수 있다[1, 9].

$$m(t) = \theta F(t), \lambda(t) = \theta F'(t) \quad (3)$$

반면에 무한고장 NHPP모형들은 수리시점에서 고장이 발생할 상황을 반영하기 위하여 기록 멈춤 통계량(Record breaking statistics)을 사용하는 RVS(Record Value Statistics)모형을 사용할 수 있다고 하였고 이 RVS모형과 NHPP모형에 관해서 평균값함수는 다음과 같이 된다고 하였다 [1].

$$m(t) = -\ln(1 - F(t)) \quad (4)$$

따라서 (2)식과 (4)식을 연관시키고 $f(t)$ 을 확률밀도함수, $F(t)$ 을 분포함수라고 하면 NHPP의 강도함수는 다음과 같이 위험함수($h(t)$)가 된다.

$$\lambda(t) = m'(t) = f(t)/(1 - F(t)) = h(t) \quad (5)$$

시간 $(0, t]$ 까지 조사하기 위한 시간절단(Time truncated)모형은 n 번째까지 고장시점 자료를

$$x_n = \sum_{i=1}^n t_i \quad (i = 1, 2, \dots, n; 0 \leq x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n) \quad (6)$$

이라고 하면 n 번째까지 고장시점이 관찰된 고장절단 모형일 경우에 데이터 집합 D_{x_n} 은 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 으로 구성되며, 이 고장절단모형에서 θ 을 모수공간이라고 표시하면 NHPP모형의 우도함수는 다음과 같이 알려져 있다[1, 9].

$$L_{NHPP}(\theta | \underline{x}) = \left(\prod_{i=1}^n \lambda(x_i) \right) \exp[-m(x_n)] \quad (7)$$

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

2.2 지수파우어분포

지수파우어분포(Exponential power distribution)는 다양한 형상모수와 척도모수로 이루어진 분포로서 다양한 현상을 나타낼 수 있는 분포로서 확률밀도함수와 분포함수는 다음과 같이 알려져 있고 척도모수(δ)와 형상모수(κ)에 따른 확률밀도함수의 형태는 [그림 1]에 요약되었다[10].

$$f(t) = (e^{1-e^{\delta t}}) e^{\delta t^{\kappa}} \delta \kappa t^{\kappa-1} \quad (8)$$

$$F(t) = 1 - e^{1-e^{\delta t}} \quad (9)$$

단, $\delta, \kappa > 0, t \in [0, \infty]$

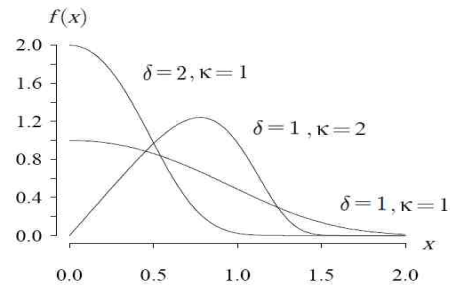


그림 1. 척도모수(δ)와 형상모수(κ)에 따른 확률 밀도함수의 형태

Fig.1. Type of Probability density function for scale parameter(δ) and shape parameter(κ)

[그림 1]에서 형상모수 $\kappa=2$ 인 경우에는 거의 대칭을 이루는 형태로서 수명분포로 적합하지 못하지만 형상모수 $\kappa=1$ 인 경우에는 고장시간이 지남에 따라 감소형태(신뢰성장)를 나타내기 때문에 수명분포로 적합하다[11]. 따라서 본 연구에서는 형상모수 $\kappa=1$ 인 경우를 적용하고자 한다.

2.3 기존의 로그파우어 NHPP모형

기존의 연구는 강도함수의 패턴이 증가하거나

감소하는 패턴을 가진 연구가 대부분 이었다. 그러나 로그파우어 강도함수는 증가하다가 감소하는 형태를 따른다. 이러한 이유로 인해 소프트웨어 신뢰성 분야에서 많이 사용되는 로그파우어 강도함수는 다음과 같이 알려져 있다[12, 13].

$$\lambda_{Log\ power} = \frac{ab \ln^{b-1}(1+t)}{1+t} \quad (10)$$

단, a 와 b 는 각각 척도모수와 형상모수를 의미한다.

(2)식을 이용하면 평균값함수는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$m_{Log\ power}(t) = a \ln^b(1+t) \quad (11)$$

로그파우어모형에 대해서는 (7)식에 (10), (11)식을 대입한 우도함수를 이용한 모수추정은 다음과 같은 식을 만족한다고 알려져 있다[12].

$$\hat{a} = \frac{n}{\ln^{\hat{b}}(1+x_n)} \quad (12)$$

$$\frac{n}{b} = \ln\left(\sum_{i=1}^n \ln(1+x_i)\right) + \hat{a} \ln^{\hat{b}}(1+x_n) \ln(\ln(1+x_n)) \quad (13)$$

또한, 임무시간(Mission time) τ 에 따른 신뢰도는 다음과 같이 유도 된다[9].

$$\hat{R}(\tau|x_n) = \exp[-a \ln^b(1+(x_n+\tau)) + a \ln^b(1+x_n)] \quad (14)$$

2.3 효율적인 모형 선택기준

최근에 모형에 대한 효율성을 조사하기 위한 기준으로서 평균제곱오차(MSE)와 결정계수(R^2)를 사용한다[8][9]. 평균제곱오차(mean square error)는 실제 관찰 값과 예측 값에 대한 차이를 측정하는 도구로서 다음과 같이 정의 된다.

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

단, $m(x_i)$ 은 시간(0, x_i]까지 나타난 에러들의 누적분포함수를 의미하고 $\hat{m}(x_i)$ 는 x_i 시점까지 평균값함수로부터 추정된 에러의 누적계수를 의미한다. 그리고 n 은 관찰 값의 수이고 k 는 모수의 수를 의미한다. 즉, MSE의 값이 작으면 효율적 모형이 된다. 그리고 결정계수(R^2)는 관찰 값의 차이에 대한 설명력을 나타내는 도구로서 다음과 같이 정의 된다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (m(x_i) - \hat{m}(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n \left(m(x_i) - \frac{\sum_{j=1}^n m(x_j)}{n}\right)^2}$$

따라서 R^2 의 값이 클수록 설명력이 커져서 효율적 모형으로 간주된다.

3. 제안된 지수파우어와 로그선형 NHPP 무한고장모형

지수파우어분포의 형상모수 $\kappa = 1$ 인 경우에 강도함수와 평균값함수는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\lambda(t) = \delta e^{\delta t}, \quad m(t) = e^{\delta t} - 1 \quad (15)$$

이경우의 우도함수는 (7)식에 (15)식을 대입하면 다음과 같다.

$$L_{NHPP}(\theta | \underline{x}) = \left[\prod_{i=1}^n \delta e^{\delta x_i} \right] \exp[-(e^{\delta x_n} - 1)] \quad (16)$$

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

모수 추정방법은 최우추정법(Maximum likelihood estimation; MLE)을 사용하였고 최우추정법을 이용하기 위한 로그우도함수는 (16)식과 관련하여 다음과 같이 유도된다.

$$\ln L_{NHPP}(\theta | \underline{x}) = n \ln \delta + \delta \sum_{i=1}^n x_i - (e^{\delta x_n} - 1) \quad (17)$$

(17)식에서 δ 에 대하여 편미분 하여 다음과 같은 식을 만족하는 $\hat{\delta}_{MLE}$ 을 수치 해석적 방법으로 계산할 수 있다[9].

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\theta | \underline{x})}{\partial \delta} = \frac{n}{\delta} + \sum_{i=1}^n x_i - x_n e^{\delta x_n} = 0 \quad (18)$$

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

또한, 임무시간(Mission time) τ 에 따른 신뢰도는 다음과 같이 유도 된다[12].

$$\hat{R}(\tau | x_n) = \exp \left[- (e^{\delta(\tau+x_n)} - 1) + (e^{\delta x_n} - 1) \right] \quad (19)$$

로그선형모형[14]의 강도함수와 평균값함수는 다음과 같이 알려져 있다.

$$\lambda(t) = e^{\alpha+\beta t}, \quad m(t) = \frac{e^{\alpha}(e^{\beta t} - 1)}{\beta} \quad (20)$$

이경우의 유도함수는 (7)식에 (20)식을 대입하면 다음과 같다.

$$L_{NHPP}(\theta | \underline{x}) = \left[\prod_{i=1}^n e^{\alpha+\beta x_i} \right] \exp \left[- \frac{e^{\alpha}(e^{\beta x_n} - 1)}{\beta} \right] \quad (21)$$

로그선형모형에 대해서는 (21)식을 이용한 모수 추정은 다음과 같은 식을 만족한다고 알려져 있다[14].

$$e^{\hat{\alpha}} = \frac{n \hat{\beta}}{e^{\hat{\beta} x_n} - 1}, \quad \sum_{i=1}^n x_i + \frac{n}{\hat{\beta}} = \frac{n x_n}{1 - e^{\hat{\beta} x_n}} \quad (22)$$

그리고 유사하게 임무시간 τ 에 따른 신뢰도는 다음과 같이 유도 된다.

$$\hat{R}(\tau | x_n) = \exp \left[- \frac{e^{\alpha}(e^{\beta(x_n+\tau)} - 1)}{\beta} + \frac{e^{\alpha}(e^{\beta x_n} - 1)}{\beta} \right] \quad (23)$$

4. 소프트웨어 고장자료 분석

표 1. 소프트웨어의 고장시간자료

Table 1. Failure time data of software

Failure number	Failure time (hours)	Failure number	Failure time (hours)
1	0.479	16	10.771
2	0.745	17	10.906
3	1.022	18	11.183
4	1.576	19	11.779
5	2.61	20	12.536
6	3.559	21	12.973
7	4.252	22	15.203
8	4.849	23	15.64
9	4.966	24	15.98
10	5.136	25	16.385
11	5.253	26	16.96
12	6.527	27	17.237
13	6.996	28	17.6
14	8.17	29	18.122
15	8.863	30	18.735

이 장에서 소프트웨어고장 간격시간 자료[15](Failure interval time data)을 가지고 제시하는 신뢰모형들을 분석하고자 한다. 이 자료의 고장시간은 18.735 시간단위에 30번의 고장이 발생된 자료이며 [표 1]에 나열 되어 있다.

또한 제시하는 신뢰모형들을 분석하기 위하여 우선 적용자료에 대한 추세검정이 선행되어야 한다[13].

추세분석에는 일반적으로 라플라스 추세검정(Laplace trend test)을 사용한다. 이 검정을 실시한 결과 [그림 2]에서 라플라스 추세검정의 결과는 라플라스요인(Laplace factor)이 -2와 2사이에 존재함으로서(극단값이 존재하지 않음) 신뢰성장(Reliability growth) 속성을 나타내고 있다. 따라서 이 자료를 이용하여 신뢰성장모형을 제시하는 것이 효율적임을 시사하고 있다[13, 16].

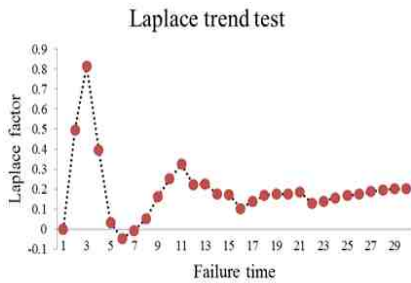


그림 2. 라플라스 추세검정
Fig. 2. Laplace trend test

모수추정은 최우추정법을 이용하고 모수추정을 용이하게 하기 위하여 원래의 고장시간 데이터를 변수변환($Failure\ time \times 10^{-1}$)하여 적용하였다.

비선형 방정식의 계산방법은 수치 해석적 기본 방법인 이분법(Bisection method)을 사용하였다. 이러한 계산은 초기 값을 0.01과 3을, 허용한계 (Tolerance for width of interval)는 10^{-5} 을 주고 수렴성을 확인하면서 충분한 반복횟수인 100번을 c-언어를 이용하여 모수추정을 수행하였다. 최우 추정법의 결과와 모형에 대한 효율성을 조사하기 위한 기준으로서 MSE (평균제곱오차)와 R^2 (결정 계수)가 [표 2]에 요약되었다.

이 표에서 로그선형모형이 로그파우어 모형과 지수파우어 모형보다 실제 값과 예측 값에 대한 차이를 측정하는 평균제곱오차가 제일 낮고 예측 값의 차이에 대한 설명력을 의미하는 결정계수도 제일 높게 나타나기 때문에 로그선형모형이 다른 모형보다 효율적인 모형으로 간주할 수 있다. 그리고 로그파우어 모형과 지수파우어 모형의 비교에 있어서는 평균제곱오차가 로그파우어 모형이 작기 때문에 지수파우어 모형보다는 효율적 모형으로 나타나고 있다. 그리고 제시된 모형이 결정 계수 값이 70%이상 나타나 이 분야에서 효율적 모형임을 확인 할수 있다[9].

표 2. 모수 추정값 및 MSE , R^2
Table 2. Parameter estimation of each model and MSE , R^2

Model	MLE	Model Comparison	
		MSE	R^2
Log power	$\hat{\alpha}_{MLE} = 20.3058$ $\hat{\beta}_{MLE} = 1.4775$	23.9879	0.701
Exp power	$\hat{\delta}_{MLE} = 1.7112$	82.9704	0.889
Log linear	$\hat{\alpha}_{MLE} = 20.3058$ $\hat{\beta}_{MLE} = 1.4775$	1.4679	0.982

Note. MLE : Maximum likelihood estimation;
 MSE : Mean square error;
 R^2 : Coefficient of determination

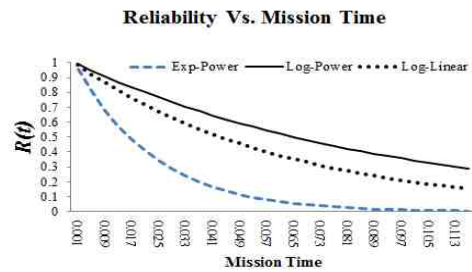


그림 3. 각 모형에 대한 신뢰도
Fig. 3. Reliability of each models

[그림 3]에서는 미래 임무시간에 대한 신뢰도 그림에서는 로그파우어모형이 로그선형모형과 지수파우어모형보다 임무시간이 증가할수록 신뢰도의 상승으로 나타나고 있다. [그림 4]은 각 모형에 대한 평균값 함수의 값을 나타내었다. 이 그림에서 로그파우어 모형을 기준 했을 때 로그선형모형은 과대평가 추정이 이루어졌고 지수파우어 모형은 과소평가 추정 되었다. [그림 5]은 각 모형에 대한 강도함수의 값을 나타내었다. 이 그림에서 로그선형모형은 거의 상수패턴을 이루고 로그파우어모형은 증가하다가 감소하는 형태를 가진 특성을 나타내고 있으며 지수파우어모형은 증가패턴을 가진 강도함수를 따르는 신뢰도모형으로 나타나고 있다.

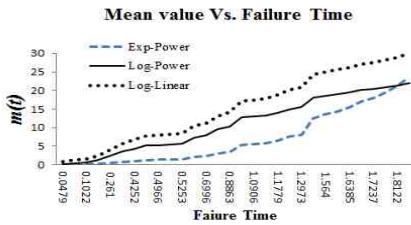


그림 4. 평균값함수 패턴
Fig. 4. Mean value function

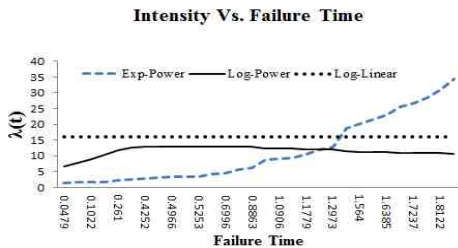


그림 5. 강도함수 패턴
Fig. 5. Intensity function

5. 결론

소프트웨어 신뢰성은 개발의 최종단계에 있는 테스트 공정이나 실제 사용단계에 있어서 소프트웨어 내에 존재하는 고장 수나 고장 발생시간에 의해서 효과적으로 평가할 수 있는 상황으로 그 평가 기술이 중요하게 된다. 따라서 소프트웨어 개발의 테스트공정이나 실제사용단계에 있어서 고장 발생 환경이나 고장 발생현상을 수리적으로 모형화가 가능하면 평가를 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 소프트웨어 관리자들이 소프트웨어 고장원인 및 검사 도구에 활용 할 수 있는 강도함수가 다양한 특성을 가지는 로그선형과 로그파우어 및 지수파우어 모형에 대하여 비교 연구 하였다.

그 결과 로그선형모형이 로그파우어 모형과 지수파우어 모형보다 실제 값과 예측 값에 대한 차이를 측정하는 평균제곱오차가 제일 낮고 예측 값의 차이에 대한 설명력을 의미하는 결정계수도 제일 높게 나타나기 때문에 로그선형모형이 다른

모형보다 효율적인 모형으로 간주할 수 있다. 미래 임무시간에 대한 신뢰도 그림에서는 로그파우어 모형이 로그선형 모형과 지수파우어 모형보다 임무시간이 증가할수록 신뢰도의 상승으로 나타나고 있다.

따라서 본 연구에 제안된 로그선형과 로그파우어 및 지수파우어 신뢰성모형도 신뢰성 측면에서 효율적이기 때문에(결정계수가 70% 이상) 이 분야에서 기존의 모형의 하나의 대안으로 사용할 수 있음을 확인 할 수 있었다. 이 연구를 통하여 소프트웨어 개발자들은 다양한 강도함수를 고려함으로써 소프트웨어 고장형태에 대한 사전지식을 파악하는데 도움을 줄 수 있으리라 판단된다.

REFERENCES

- [1] Gokhale, S. S. and Trivedi, K. S. "A time / structure based software reliability model," Annals of Software Engineering. 8, 1999, pp. 85-121, 1999.
- [2] Goel AL, Okumoto K, "Time-dependent fault detection rate model for software and other performance measures,"IEEE Trans Reliab. 28, pp. 206-11,1978.
- [3] Yamada S, Ohba H."S-shaped software reliability modeling for software error detection," IEEE Trans Reliab, 32, 1983, pp. 475-484, 1983.
- [4] Zhao M. "Change-point problems in software and hardware reliability," Commun. Stat Theory Methods, 22(3), pp. 757-768, 1993.
- [5] Shyur H-J. "A stochastic software reliability model with imperfect debugging and change-point," J. Syst. Software 66, pp. 135-14, 2003.
- [6] Pham H, Zhang X. "NHPP software reliability and cost models with testing coverage," Eur J. Oper Res, 145, 2003, pp. 445-454, 2003.

[7] Huang C-Y. "Performance analysis of software reliability growth models with testing-effort and change-point," J. Syst Software 76, pp. 181-194, 2005.

[8] Kuei-Chen, C., Yeu-Shiang, H., and Tzai-Zang, L. "A study of software reliability growth from the perspective of learning effects," Reliability Engineering and System Safety 93, pp. 1410-1421, 2008.

[9] Hee-Cheul KIM, "The Assessing Comparative Study for Statistical Process Control of Software Reliability Model Based on Rayleigh and Burr Type", Journal of Korea Society of Digital Industry and Information Management, Volume 10, No.2, pp. 1-11. 2014.

[10] <http://www.math.wm.edu/~leemis/chart/UDR/UDR.html>.

[11] Lawless, J. F, "Statistical Models and Methods for Lifetime Data", John Wiley & Sons, New York, 1981.

[12] Vincent Almering, Michiel van Genuchten, and Ger Cloudt, Peter J.M. Sonnemans, "Software Reliability Growth Models in Practice", IEEE SOFTWARE, pp. 82-8, 2007.

[13] Tae-Jin Yang and Hee-Cheul Kim, "A Comparative Study on Infinite NHPP Cost Model Based on Intensity Function of Log Power Form", Journal of The Korea Knowledge Information Technology Society, Vol. 9, No.2, 2014, pp. 295-302, 2014

[14] I.B. Frenkel, I.B. Gertsbakh and L.V. Khvatskin, "PARAMETER ESTIMATION AND HYPOTHESES TESTING FOR NONHOMOGENEOUS POISSON PROCESS", Transport and Telecommunication Vol. 4, No.2, 2013, pp. 9-17, 2013.

[15] Y. HAYAKAWA and G. TELFAR, "Mixed Poisson-Type Processes with Application in

Software Reliability", Mathematical and Computer Modelling, 31, pp. 151-156, 2000.

[16] K. Kanoun, J. C. Laprie, "Handbook of Software Reliability Engineering," M. R. Lyu, Editor, chapter Trend Analysis. McGraw-Hill New York, NY, 1996, pp. 401-437, 1996.

저자약력

양 태 진 (Tae-Jin Yang)

[정회원]



- 1992년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 한양대학교 전자공학과 박사(수료)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 산학협력단 교수

<관심분야>

소프트웨어신뢰성공학,
인공지능(Artificial Intelligence),
Fuzzy Application & Neural-Network