

수명분포가 자유도에 의존한 카이제곱분포를 따르는 무한고장 NHPP 소프트웨어 신뢰성 모형에 관한 비교연구

김희철*, 김재욱**

A Comparative Study on the Infinite NHPP Software Reliability Model Following Chi-Square Distribution with Lifetime Distribution Dependent on Degrees of Freedom

Hee-Cheul Kim* , Jae-Wook Kim**

요약 소프트웨어 개발과정동안 소프트웨어 신뢰성 요인은 매우 기본적인 사항이다. 소프트웨어 고장파악을 위한 무한고장 비동질적인 포아송 과정을 이용할 때 고장발생률 혹은 위험함수가 일정하거나 증가 또는 감소하는 속성을 가진다. 본 논문에서는 소프트웨어 신뢰 성능에 관한 효율성을 비교하는 자유도에 의존하는 카이제곱 분포를 적용한 신뢰성 모형을 제안하였다. 효율적인 모형을 평가하기 위하여 평균제곱오차(MSE)와 결정계수(R^2)를 이용하고 최우추정법과 수치 해석적 방법을 사용하여 모수추정 알고리즘이 수행되었다. 제안하는 카이제곱분포의 자유도를 이용한 신뢰성 모형을 위해 실제 고장 간격 데이터를 사용한 고장 성능 분석이 적용되었다. 고장데이터 분석은 카이제곱분포의 자유도에 근거한 강도함수를 기준으로 비교되었다. 데이터 신뢰성을 확인하기 위하여 라플라스 추세검정이 적용되었다. 본 연구에 제안된 카이제곱분포의 자유도는 다양한 고장현상을 표현 할 수 있기 때문에 (결정계수가 90% 이상), 신뢰성 분야에서 활용 할 수 있는 모형으로 활용 할 수 있다. 이 연구 결과를 적용하면 소프트웨어 개발 설계자에게 다양한 자유도를 적용하여 소프트웨어 고장패턴을 예측함으로써 효율적인 모형을 개발하는데 표준 지침으로 적용 할 수 있다.

Abstract Software reliability factor during the software development process is elementary. Case of the infinite failure NHPP for identifying software failure, the occurrence rates per fault (hazard function) have the characteristic point that is constant, increases and decreases. In this paper, we propose a reliability model using the chi - square distribution which depends on the degree of freedom that represents the application efficiency of software reliability. Algorithm to estimate the parameters used to the maximum likelihood estimator and bisection method, a model selection based on the mean square error (MSE) and coefficient of determination(R^2), for the sake of the efficient model, were employed. For the reliability model using the proposed degree of freedom of the chi - square distribution, the failure analysis using the actual failure interval data was applied. Fault data analysis is compared with the intensity function using the degree of freedom of the chi - square distribution. For the insurance about the reliability of a data, the Laplace trend test was employed. In this study, the chi-square distribution model depends on the degree of freedom , is also efficient about reliability because have the coefficient of determination is 90% or more, in the ground of the basic model, can used as a applied model. From this paper, the software development designer must be applied life distribution by the applied basic knowledge of the software to confirm failure modes which may be applied.

Key Words :Software Reliability, NHPP, Bivariate Chi-square Distribution, Mission Time, Degree of freedom

*Corresponding Author : Department of Industrial & Management Engineering, Namseoul University(kim1458@nsu.ac.kr)

**Department of Electronic Engineering, Namseoul University

Received September 12, 2017

Revised September 18, 2017

Accepted October 12, 2017

1. 서론

소프트웨어 결함으로 인한 컴퓨터 시스템의 고장은 모든 산업분야에 큰 손실을 초래할 수도 있다. 따라서 소프트웨어 개발과정 동안에 소프트웨어 신뢰성에 관한 요인 파악은 기본적인 사항이 된다. 이 요인들은 소프트웨어 운용자의 사용조건과 테스트 비용의 최소화를 충족시켜야 한다. 소프트웨어 테스트(디버깅)측면에서 비용을 최소화하기 위해서는 소프트웨어의 신뢰요인의 특성과 테스트 비용의 특성을 파악하는 작업은 필수적이다. 따라서 신뢰도 성능, 비용 및 소프트웨어 인도 시기에 대한 특성을 파악하면서 소프트웨어 개발과정이 이루어져야 한다. 결국 소프트웨어 제품의 결함내용에 대한 모형 개발은 기본적인 작업이 된다. 현재까지 많은 소프트웨어 신뢰성 성능 파악에 대한 연구가 제시되어 왔다. 현재까지 연구 중에서 비동질적 포아송 과정(Non-Homogeneous Poisson Process ; NHPP)을 활용한 모형[1]은 결함 탐색요인 측면에서는 효율적인 모형으로 간주되고 결함이 생성되면 즉각적으로 디버깅되고 이러한 디버깅 과정동안 새로운 결함이 생성되지 않는다는 전제를 두고 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. Pham와 Zhang[3]는 테스트 커버리지(Coverage)에 근거한 소프트웨어 안정도에 초점을 둔 소프트웨어 안정도 모형을 제시하기도 하였다.

그리고 S-형태 모형은 소프트웨어 운용자들이 소프트웨어 고장 추세를 예측 수 있는 학습과정을 제시하기도 하였다[4]. 그리고 김희철[5]은 Rayleigh형과 Burr형 NHPP 소프트웨어 신뢰모형을 이용하여 통계적 공정관리 접근방법을 연구 하였다. 그 결과 레일리분포모형 보다는 버르분포모형이 비교적 안정된 모형임을 확인하였다.

따라서 본 연구는 NHPP 과정을 기초로 수명

분포가 미지의 모집단의 모수의 값을 추정하고 이러한 추정치의 변동성을 계산하는 데 사용할 수 있는 데이터가 제공하는 정보 양을 의미하는 자유도 v 가 2, 4, 6 인 2변량 카이제곱분포인 경우를 적용하여 신뢰성 성능을 비교 분석 하고자 한다.

2. 관련연구

2.1 NHPP 소프트웨어 신뢰성

$N(t)$ 을 시간 t 까지 관찰된 소프트웨어의 고장수라고 표현하고, $m(t)$ 를 이에 대한 기대값을 의미하는 평균값 함수(Mean Value Function)로 표현하고 $\lambda(t)$ 을 t 에서의 순간 결함 검출율을 의미하는 강도함수(Intensity function)라고 하면 비동질 포아송 과정(NHPP)에 기초하면 고장수인 $N(t)$ 는 모수 $m(t)$ 을 가진 포아송 확률밀도함수(Probability density function)로 적용 할 수 있다. 즉 다음과 같은 과정으로 표현 할 수 있다.

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

결국 NHPP모형에서 평균값함수 $m(t)$ 와 강도함수 $\lambda(t)$ 는 다음과 같은 관계가 있다[1, 6].

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

이처럼 시간영역모형(Time domain models)들은 NHPP에 기초하여 확률고장과정으로 표현이 가능하다[1].

2.2 카이제곱 분포

2변량 카이제곱분포($\sigma^2 \chi^2$ distribution)[7, 8]는 통계적 검정에 많이 사용되고 자유도에 의존하는 분포로서 확률밀도함수와 분포함수는 다음과 같은 식으로 알려져 있다.

$$f_{\chi^2}(t|v, \sigma^2) = \frac{1}{2^{v/2} \sigma^v \Gamma(2/v)} t^{v/2-1} e^{-t/2\sigma^2} \quad (3)$$

$$F_{\chi^2}(t|v, \sigma^2) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{2\sigma^2}\right) \sum_{i=0}^{v/2-1} \frac{(t/2\sigma^2)^i}{i!} \quad (4)$$

단, $t > 0$, σ^2 는 척도모수(Scale parameter)를 나타내며 양의정수 v 는 자유도(Degree of freedom: DF)의 속성이면서 동시에 형상모수(Shape parameter)의 역할을 한다. 자유도는 미지의 모집단의 모수의 값을 추정하고 이러한 추정치의 변동성을 계산하는 데 사용할 수 있는 데이터가 제공하는 정보 양을 의미한다. 이 값은 표본의 관측 값의 수 및 모형의 모수 수에 따라 결정된다. 표본 크기를 증가시키면 모집단에 대한 더 많은 정보를 제공하므로 데이터의 자유도가 증가하게 된다 [9]. (3)식과 (4)식을 간결하게 하기 위하여 $1/\sigma^2 = \theta$ 으로 치환하면 확률밀도함수와 분포함수는 다음과 같이 변형된다.

$$f_{\chi^2}(t|v, \theta) = \frac{\theta^{v/2}}{2^{v/2} \Gamma(2/v)} t^{v/2-1} e^{-\theta t/2} \quad (5)$$

$$F_{\chi^2}(t|v, \theta) = 1 - \exp\left(-\frac{\theta t}{2}\right) \sum_{i=0}^{v/2-1} \frac{(\theta t/2)^i}{i!} \quad (6)$$

따라서 위험함수(Hazard function)는 (5)식과 (6)식을 이용하면 다음과 같이 유도된다[10].

$$h(t) = \frac{f_{\chi^2}(t|v, \theta)}{1 - F_{\chi^2}(t|v, \theta)} = \frac{\frac{\theta^{v/2}}{2^{v/2} \Gamma(2/v)} t^{v/2-1}}{\sum_{i=0}^{v/2-1} \frac{(\theta t/2)^i}{i!}} \quad (7)$$

2.3 효율적인 모형 선택기준

모형에 대한 효율성을 판단하기 위한 기준척도로서 평균제곱오차(MSE)와 결정계수(R^2)를 적용할 수 있다[4]. 평균제곱오차(mean square error)는 실제 관측 값과 예측 값에 대한 차이에 대한

측도를 비교하기 위한 기준으로 다음과 같다[11].

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (m(x_i) - \hat{m}(x_i))^2}{n-k} \quad (8)$$

단, $m(x_i)$ 은 시간(0, x_i]까지 나타난 결함들의 누적수이고 $\hat{m}(x_i)$ 는 x_i 시점까지 평균값 함수로부터 추정된 결함의 누적개수를 의미한다. 그리고 n 은 관찰 데이터 개수이고 k 는 추정 할 모수의 수를 의미한다. 즉, MSE의 값이 작으면 효율적 모형으로 간주되고 결정계수(R^2)는 관측 값의 차이에 대한 측도를 의미하는 설명력을 나타내는 기준으로서 다음과 같이 알려져 있다 [11].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (m(x_i) - \hat{m}(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n \left(m(x_i) - \frac{\sum_{j=1}^n m(x_j)}{n}\right)^2} \quad (9)$$

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

3. 자유도를 고려한 카이제곱분포 NHPP 무한고장모형

(3)식과 (4)식, 그리고 자유도 $v=2$ 을 이용한 카이제곱분포의 무한고장 NHPP의 위험함수($h(t|2, \theta)$)와 강도함수($\lambda(t|2, \theta)$)는 같은 표현이 된다[10]. 결국 강도함수와 평균값함수는 다음과 같이 유도 된다[10, 11].

$$\lambda(t|2, \theta) = \frac{F_{\chi^2}(2, \theta)}{1 - F_{\chi^2}(t|2, \theta)} = \frac{\theta}{2} = h(t|2, \theta) \quad (10)$$

$$m(t|2, \theta) = -\ln(-F(t|\theta, 2)) = (\theta/2)t \quad (11)$$

한편, 시간 (0, t]까지 관찰하기 위한 시간멈춤(Time truncated)모형은 n 번째의 고장시간은 다음과 같은 관계로 요약 할 수 있다.

$$x_n = \sum_{i=1}^n t_i \quad (i=1,2,\dots,n; 0 \leq x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n) \quad (12)$$

따라서 n 번째까지 고장시점이 관찰된 고장시간 멈춤 모형일 경우에 θ 을 모수공간이라고 정의하면 NHPP모형의 우도함수는 다음과 같은 식으로 유도 된다[1, 5].

$$L_{NHPP}(\theta | \underline{x}) = \left(\prod_{i=1}^n \lambda(x_i) \right) \exp[-m(x_n)] \quad (13)$$

$$= \left(\prod_{i=1}^n \frac{\theta}{2} \right) \exp\left[-\frac{\theta x_n}{2}\right]$$

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 (13)식과 관련하여 다음과 같이 유도된다.

$$\ln L_{NHPP}(\theta | \underline{x}) = n \ln \theta - n \ln 2 - \frac{\theta}{2} x_n = 0 \quad (14)$$

따라서 (14)식에서 θ 에 대하여 편미분 하여 다음과 같은 조건식을 만족하는 $\hat{\theta}_{MLE}$ 수치 해석적 방법으로 추정할 수 있다 [10].

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\theta | \underline{x})}{\partial \theta} = \frac{n}{\theta} - \frac{x_n}{2} = 0 \quad (15)$$

$$\text{즉, } \hat{\theta} = \frac{2n}{x_n} \quad (16)$$

또한 자유도 $v=4$ 을 이용한 카이제곱분포의 무한고장 NHPP의 강도함수와 평균값함수는 다음과 같이 유도 된다.

$$\lambda(t|4,\theta) = \frac{\theta^2 t}{2(2+\theta t)} \quad (17)$$

$$m(t|4,\theta) = \frac{\theta t}{2} - \ln\left(1 + \frac{\theta t}{2}\right) \quad (18)$$

로그우도함수는 (17)식과 (18)식과 관련하여

다음과 같이 유도된다.

$$\ln L_{NHPP}(\theta | \underline{x}) = \quad (19)$$

$$2n \ln \theta + \sum_{i=0}^n \ln x_i - n \ln 2 - \sum_{i=1}^n \ln(2 + \theta x_i)$$

$$- \frac{\theta x_n}{2} + \ln\left(1 + \frac{\theta x_n}{2}\right) = 0$$

유사한 방법으로 (19)식에서 θ 에 대하여 편미분 하여 다음과 같은 조건식을 만족하는 $\hat{\theta}_{MLE}$ 수치 해석적 방법으로 추정할 수 있다 [8].

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\theta | \underline{x})}{\partial \theta} = \quad (20)$$

$$\frac{2n}{\theta} - \sum_{i=0}^n \frac{x_i}{2 + \theta x_i} - \frac{x_n}{2} + \frac{\frac{x_n}{2}}{1 + \frac{\theta x_n}{2}} = 0$$

자유도 $v=6$ 인 경우에는 카이제곱분포의 무한고장 NHPP의 강도함수와 평균값함수는 다음과 같이 유도 된다.

$$\lambda(t|6,\theta) = \frac{\frac{\theta^3}{2^4} t^2}{1 + \frac{\theta t}{2} + \frac{\theta^2 t^2}{2^3}} \quad (21)$$

$$m(t|6,\theta) = \frac{\theta t}{2} - \ln\left(1 + \frac{\theta t}{2} + \frac{\theta^2 t^2}{2^3}\right) \quad (22)$$

로그우도함수는 (21)식과 (22)식과 관련하여 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\theta | \underline{x})}{\partial \theta} =$$

$$\frac{3n}{\theta} - \sum_{i=1}^n \frac{\frac{x_i}{2} + \frac{x_i^2 \theta}{2^2}}{1 + \frac{\theta x_i}{2} + \frac{x_i^2 \theta^2}{2^3}} - \frac{x_n}{2} + \frac{\frac{x_n}{2} + \frac{x_n^2 \theta}{2^2}}{1 + \frac{\theta x_n}{2} + \frac{x_n^2 \theta^2}{2^3}} = 0 \quad (23)$$

유사한 방법으로 (23)식에서 θ 에 대하여 편미

분 하여 다음과 같은 조건식을 만족하는 $\hat{\theta}_{MLE}$ 을 수치 해석적 방법으로 추정할 수 있다 [10].

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\theta | \underline{x})}{\partial \theta} = \frac{2n}{\theta} - \sum_{i=0}^n \frac{x_i}{2 + \theta x_i} - \frac{x_n}{2} + \frac{\frac{x_n}{2}}{1 + \frac{\theta x_n}{2}} = 0 \quad (24)$$

4. 소프트웨어 고장자료 신뢰성 분석

표 1. 소프트웨어의 고장시간자료
Table 1. software failure time data

Failure number	Failure time (hours)	Failure interval (hours)
1	0.479	0.479
2	0.745	0.266
3	1.022	0.277
4	1.576	0.554
5	2.61	1.034
6	3.559	0.949
7	4.252	0.693
8	4.849	0.597
9	4.966	0.117
10	5.136	0.17
11	5.253	0.117
12	6.527	1.274
13	6.996	0.469
14	8.17	1.174
15	8.863	0.693
16	10.771	1.908
17	10.906	0.135
18	11.183	0.277
19	11.779	0.596
20	12.536	0.757
21	12.973	0.437
22	15.203	2.23
23	15.64	0.437
24	15.98	0.34
25	16.385	0.405
26	16.96	0.575
27	17.237	0.277
28	17.6	0.363
29	18.122	0.522
30	18.735	0.613

이 절에서는 소프트웨어 고장 시간 정보 자료 [12] (Failure time information data)을 이용하여 본 논문에서 제안하는 소프트웨어 신뢰모형들을 이용한 소프트웨어 고장시간을 비교 및 분석하고자 한다. 이 자료의 고장시간은 18.735시간단위에 30번의 고장이 관찰된 정보 자료이며 표 1에 나타내었다. 또 한 제시하는 신뢰모형들을 분석 및 평가하기 위하여 자료에 대한 추세검정이 이루어져야 한다[10, 13]. 본 연구에서 추세분석은 라플라스 추세검정(Laplace trend test)을 이용하였다. 이 검정을 실시한 결과 그림 1에서 라플라스요인 (Factor)이 -2와 2사이의 값으로 추정됨으로서 즉, 극단값(Extreme value)이 관찰되지 않으므로 이 자료를 이용하여 신뢰성 모형을 비교 및 평가하는 것이 타당함을 나타내고 있다[13, 14].

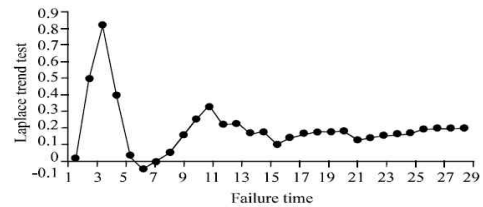


그림 1. 라플라스 추세검정
Fig. 1 Laplace trend test

모수추정은 최우추정법을 선택하고 비선형 방정식의 계산 알고리즘은 수치 해석적 이분법 (Bisection method) 알고리즘을 적용하였다. 이러한 계산과정은 초기 값을 0.1과 5.0을, 허용한계 (Tolerance for width of interval)는 10^{-5} 을 주고 수렴속성 반복횟수인 100번을 C-언어를 이용하여 모수추정을 시행하였다. 최우추정법의 추정결과와 모형에 대한 효율성을 파악하기 위한 척도로서 MSE(평균제곱오차)와 R^2 (결정계수)가 표 2에 추정한 결과가 요약되었다.

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

Model	MLE	Model Comparison	
		MSE	R^2
$DF=2$	$\hat{\theta}_{MLE} = 3.2026$	1.4131	0.9903
$DF=4$	$\hat{\theta}_{MLE} = 3.6483$	3.2746	0.9879
$DF=6$	$\hat{\theta}_{MLE} = 4.1169$	5.6132	0.9846

Note. DF : Degree of freedom;

MLE : Maximum likelihood estimation;

MSE : Mean square error;

R^2 : Coefficient of determination

이 표에서 본 연구에서 제안된 자유도(형상모수) DF 가 2, 4, 6 중에서 $DF=2$ 인 경우가 $DF=4$ 와 $DF=6$ 보다 실제 값과 예측 값에 대한 차이에 대한 측도를 의미하는 평균제곱오차가 작고 예측 값의 차이에 대한 설명력에 대한 측도를 나타내는 결정계수도 $DF=2$ 인 경우가 다른 경우보다 높은 성향으로 나타나기 때문에 자유도가 비교적 작은 경우($DF=2$)가 효율적인 모형으로 사료된다. 즉, 표본의 관측 값의 수 및 모형의 모수 수에 따라 결정되는 자유도가 작은 경우가 효율적이라 판단된다. 그러나 제안된 모형의 결정계수 값이 90% 이상 추정되어 비교적 소프트웨어 신뢰성 분야에서 효율적 모형임을 판단 할 수 있다[9].

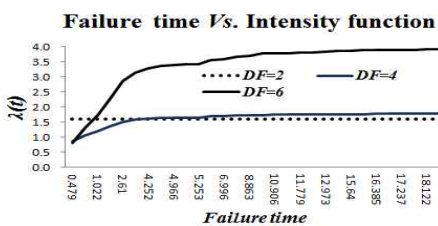


그림 2. 강도함수의 형태
Fig. 2. Pattern of intensity function

그림 2는 강도함수에 대한 유형이 요약 되었다. 이 그림에서 자유도가 $DF=2$ 인 경우는 고장시간에 독립하여 상수 유형을 보이고 있지만 $DF=4$ 와

$DF=6$ 인 경우는 비-감소 유형으로 나타나고 있다.

그림 3은 평균값함수에 대한 유형을 보여주고 있다. 이 유형에서 자유도 DF 가 2, 4, 6인 경우 모두 비-감소 패턴을 보이고 있지만 $DF=2$ 인 경우가 $DF=4$ 와 $DF=6$ 인 경우보다 참값에 비교해 상대적으로 그 차이의 폭이 작게 나타남을 보이고 있다.

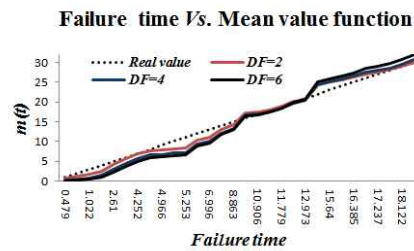


그림 3 평균값 함수의 형태
Fig. 4. Pattern of mean value function

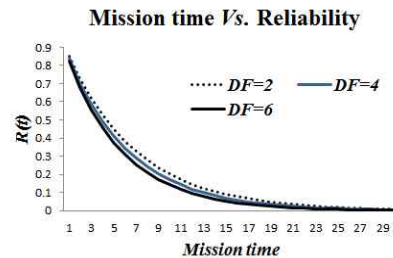


그림 4. 신뢰도 함수의 형태
Fig. 4. Pattern of reliability

그림 4는 NHPP 모형에서 테스트 시점 $x_{30} = 18.735$ 에서 소프트웨어 고장이 발생하고 신뢰 구간 $(18.735, 18.735 + t]$ (단, t 는 임무시간(Mission time))에서 소프트웨어의 고장이 발생하지 않을 확률인 신뢰도(Reliability) $\hat{R}(t | 18.735)$ 는 다음과 같은 형식으로 표현 된다[11].

$$\hat{R}(t | 18.735) = e^{-\int_{18.735}^{18.735+t} \lambda(\tau) d\tau} \quad (25)$$

$$= \exp[-\{m(t + 18.735) - m(18.735)\}]$$

결국 그림4에서 임무시간에 대한 신뢰도 특징은 자유도 DF 가 2, 4, 6 인 경우 모두 비-증가 패턴을 보이고 있지만 임무시간이 증가 할수록 $DF=2$ 인 경우가 $DF=4$ 와 $DF=6$ 인 경우보다 신뢰도가 상대적으로 상승됨을 보이고 있다.

5. 결론

소프트웨어 신뢰특성은 소프트웨어 개발의 마지막 단계에서 테스트 과정이나 실제 운용단계에서 소프트웨어 내에 존재하는 결함 수와 고장 발생시간에 의해서 효율적으로 비교 및 평가할 수 있는 환경으로 그 비교 및 평가 기술이 필요하게 된다. 결과적으로 소프트웨어 개발의 테스트과정이나 실제운용단계에 있어서 고장 발생 요인이나 고장 발생추세를 정량적으로 모형화가 가능하면 활용도를 비교 및 평가가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 소프트웨어 운용자에게 소프트웨어 고장 유형 파악에 적용 할 수 있는 수명분포가 자유도에 의존하는 2변량 카이제곱분포인 경우를 적용하여 신뢰성 성능을 비교 분석 하였다.

그 결과 본 연구에서 제안된 자유도(형상모수)가 작은 경우가 큰 경우와 비교하여 상대적으로 실제 값과 예측 값에 대한 차이에 대한 측도를 의미하는 평균제곱오차가 작고 예측 값의 차이에 대한 설명력에 대한 측도를 나타내는 결정계수도 높은 성향으로 나타나기 때문에 자유도가 비교적 작은 경우가 효율적인 모형으로 사료된다. 그러나 자유도를 고려한 모형의 결정계수 값이 90%이상 추정됨으로서 비교적 이 분야에서 효율적 모형임을 인정 할 수 있다. 또한 미래 임무시간에 대한 신뢰도인 경우도 자유도가 작은 경우가 높은 경향을 따른다고 간주 할 수 있다. 따라서 본 연구에 제안된 2변량 카이제곱분포의 자유도를 적용한 모형도 이 분야에서 활용할 수 있는 모형으로 판단 할 수 있다. 이 연구를 통하여 소프트웨어 운용자들은 수명분포의 다양한 자유도를 적용할 경우에 소프트웨어 고장형태에 대한 유형을 인지하는 지침의 역할을 수행 할 수 있으리라 판단된다.

REFERENCES

- [1] Gokhale, S. S. and Trivedi, K. S. A, "time/structure based software reliability model", Annals of Software Engineering. 8, pp. 85-121. 1999.
- [2] Goel A L, Okumoto K, "Time-dependent fault detection rate model for software and other performance measures", IEEE Trans. Reliab., 28, pp.206-11, 1978.
- [3] Pham H, Zhang X., "NHPP software reliability and cost models with testing coverage", Eur. J. Oper. Res, 145, pp.445-454, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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, Vol. 10, No. 2, pp. 1-11. 2014.
- [6] Hee-Cheul 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.
- [7] V. K, Rohatgi, "Statistical Inference", JOHN WILEY & SONS, New, York, pp. 398-416, 1984.
- [8] KIM Hee Cheul, "The Study for NHPP Software Reliability Model based on Chi-Square Distribution", Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 11. No. 1, pp.45-53,

2006.

[9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom_\(statistics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom_(statistics))

[10] Tae-Hyun Yoo, "The Infinite NHPP Software Reliability Model based on Monotonic Intensity Function", Indian Journal of Science and Technology, Vol. 8, No. 14, pp. 1-7, 2015.

[11] Kim H-C, Kim K-S, "Software Development Cost Model based on NHPP Gompertz Distribution", Indian Journal of Science and Technology, Vol. 9, No. 20, pp. 1-6, 2016.

[12] Hayakawa Y, Telfar G. "Mixed poisson-type processes with application in software reliability", Mathematical and Computer Modelling, Vol. 31, pp.151-156, 2000..

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

[14] Hee-Cheul Kim and Hyun-Cheul Shin, "The Comparative Study of NHPP Software Reliability Model Based on Exponential and Inverse Exponential Distribution", The Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 133-140, 2016.

저자약력

김희철 (Hee-Cheul Kim) [정회원]



- 1992년 2월 : 동국대학교 통계학과 (이학석사)
- 1998년 8월 : 동국대학교 통계학과 (이학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 산업경영공학과 교수

<관심분야>
소프트웨어 신뢰성 공학, 전산 통계, 웹-프로그래밍

김재욱 (Jae-Wook Kim) [정회원]



- 1998년 8월 : 호서대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 호서대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 전자공학과 교수

<관심분야>
자동제어, 퍼지제어, chip inductor 개발, 자성박막 재료 및 소자의 개발, 프로그래밍