

이중 결합 파워어 분포 특성을 이용한 유한고장 NHPP모형에 근거한 소프트웨어 학습효과 비교 연구

김희철* · 김경수**

요 약

본 연구에서는 소프트웨어 제품을 개발하여 테스트를 하는 과정에서 소프트웨어 관리자들이 소프트웨어 및 검사 도구에 효율적인 학습기법을 이용한 NHPP 소프트웨어 모형에 대하여 연구 하였다. 적용모형은 와이블 분포를 확장한 이중 결합 파워어 분포모형을 적용한 유한고장 NHPP에 기초하였다. 소프트웨어 오류 탐색 기법은 사전에 알지 못하지만 자동적으로 발견되는 에러를 고려한 영향요인과 사전 경험에 의하여 세밀하게 에러를 발견하기 위하여 테스트 관리자가 설정해놓은 요인인 학습효과의 특성에 대한 문제를 비교 제시 하였다. 그 결과 학습요인이 자동 에러 탐색요인보다 큰 경우가 대체적으로 효율적인 모형임을 확인 할 수 있었다. 본 논문의 수치적인 예에서는 고장 간격 시간 자료를 적용하고 모수추정 방법은 최우추정법을 이용하고 추세분석을 통하여 자료의 효율성을 입증한 후 평균제곱오차와 R^2 (결정계수)를 이용하여 효율적인 모형을 선택 비교하였다.

The Comparative Study for Property of Learning Effect based on Software Reliability Model using Doubly Bounded Power Law Distribution

Kim Hee Cheul* · Kyung-Soo Kim**

ABSTRACT

In this study, software products developed in the course of testing, software managers in the process of testing software test and test tools for effective learning effects perspective has been studied using the NHPP software. The doubly bounded power law distribution model makeup Weibull distribution applied to distribution was based on finite failure NHPP. Software error detection techniques known in advance, but influencing factors for considering the errors found automatically and learning factors, by prior experience, to find precisely the error factor setting up the testing manager are presented comparing the problem. As a result, the learning factor is greater than automatic error that is generally efficient model could be confirmed. This paper, a numerical example of applying using time between failures and parameter estimation using maximum likelihood estimation method, after the efficiency of the data through trend analysis model selection were efficient using the mean square error and R^2 .

Key words : Learning Effects, NHPP, Doubly Bounded Power Law Distribution.

1. 서론

소프트웨어 고장으로 인한 컴퓨터 시스템의 고장은 우리 사회에 엄청난 손실을 유발 할 수 도 있다. 따라서 소프트웨어 개발 과정에서 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 방출 시간의 고려사항을 가진 소프트웨어 개발 과정은 필수 불가결 하다. 결국 소프트웨어 제품의 결함내용을 예측하기 위한 모형 개발이 필요하다. 지금까지 많은 소프트웨어 신뢰성 모형이 제안 되었다. 이 중에서 비동질적 포아송 과정(NHPP)에 의존한 모형은 여러 탐색 과정측면에서는 우수한 모형[1]이고 이 모형은 결함이 발생하면 즉시 제거되고 디버깅 과정에서 새로운 결함이 발생되지 않는다는 가정을 하고 있다.

Gokhale과Trivedi [1]은 고양된 비동질적인 포아송 과정 모형(enhanced NHPP) 모형을 제시하였고 Goel 과 Okumoto [2]은 지수적 소프트웨어 신뢰성 모형(exponential software reliability growth model)을 제안 하였다. 이 모형은 결함의 누적수가 S 형태나 지수적 형태(S-shaped or exponential-shaped)를 가진 평균값 함수(mean value function)를 이용하였다. 이러한 모형에 의존한 일반화 모형은 Yamada 와 Ohba [3]에 의해 지연된 S 형태 신뢰 성장모형(delayed S-shaped reliability growth model)과 변곡된 S 형태 신뢰 성장 모형(inflexion S-shaped reliability growth model)이 제안되었다. Zhao [4]는 소프트웨어 신뢰도에서 변환점 문제를 제시하였고 Shyur [5]는 변환점을 이용한 일반화한 신뢰도 성장 모형을 제안하였다. Pham와 Zhang[6]는 테스트 커버리지(coverage)를 측정하여 소프트웨어 안정도를 평가 할 수 있는 소프트웨어 안정도 모형을 제시했다. 비교적 최근에, Huang [7]은 일반화 로지스틱 테스트 노력 함수(generalized logistic testing-effort function)와 변환점 모수(change-point parameter)를 통합하여 효율적인 소프트웨어 신뢰성 예측되는 기술을 제시하기도 하였다. 그리고 최근에는 S-형태 모형은 소프트웨어 관리자들이 소프트웨어 및

검사 도구에 익숙해지는 학습 과정을 설명할 수 있다고 하였다[8].

따라서 본 연구는 지연된 소프트웨어 S-형태 신뢰성모형을 이용한 NHPP 소프트웨어 모형에 대한 자동적으로 발견되는 에러를 고려한 영향요인(influential factor)과 사전에 설정되는 학습요인(learning factor)으로 구성된 학습효과와 특성에 대한 문제를 비교 제시 하였다.

2. 관련 연구

2.1 유한고장 NHPP 모형

신뢰도에서 관측시간 $(0, t]$ 사이에 발견된 고장 수 $N(t)$ 을 모형화 하는데 비동질적 포아송 과정(non-homogeneous poisson process; NHPP)이 널리 사용하여 왔다.

이 과정(process)에서 강도함수(intensity function) 혹은 고장 발생률(rate of occurrence of failure; ROC OF) $\lambda(t) = dE[N(t)]/dt$ 은 t 에 대한 단조(monotonic) 함수로 흔히 가정 한다[3]. 이 범주에서 지금까지 알려진 모형들은 Goel-Okumoto 모형, Weibull 모형 그리고 Cox-Lewis 모형 등이 있는데 이모형들에 대한 강도함수는 각 각 시간에 의존한 함수, 멱(power) 함수, 대수 선형(log-linear) 함수를 가정하였다[9].

NHPP 모형에서 평균값 함수 $m(t)$ (mean value function)와 강도 함수 $\lambda(t)$ 는 다음과 같은 관계로 표현 할 수 있다.

$$m(t) = \int_0^t \lambda(s) ds, \quad \frac{dm(t)}{dt} = \lambda(t) \quad (1)$$

$N(t)$ 는 모수 $m(t)$ 을 가진 포아송 확률밀도함수 (probability density function) 로 알려져 있다. 즉,

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

이처럼 시간관련 모형(time domain models)들은 NHPP에 의해서 확률 고장 과정으로 설명이 가능하다.

이러한 모형들은 고장 강도 함수 $\lambda(t)$ 가 다르게 표현됨으로서 평균값 함수 $m(t)$ 도 역시 다르게 나타난다. 이러한 NHPP 모형들은 유한 고장 모형과 무한 고장 범주로 분류한다[10]. 유한 고장(finite failure) NHPP 모형들은 충분한 테스트 시간이 주어지면 결함들(faults)의 기대 값이 유한 값($\lim_{t \rightarrow \infty} m(t) = \theta < \infty$)을 가지고 반면에 무한 고장(infinite failure) NHPP 모형들은 무한 값을 가진다고 가정 된다. 유한 고장 NHPP 모형에서 충분한 테스트 시간이 주어졌을 때 탐색되어 질 수 있는 결함의 기대 값을 θ 라고 표현하고 $F(t)$ 를 분포함수라고 표현하면 유한 고장 NHPP모형의 평균값 함수는 다음과 같이 표현 할 수 있다[9, 10].

$$m(t) = \theta F(t) \tag{3}$$

(3)식으로 부터 순간고장 강도함수(instantaneous failure intensity) $\lambda(t)$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$\lambda(t) = \theta F'(t) \tag{4}$$

시간 $(0, t]$ 까지 조사하기 위한 시간 절단(time truncated)모형은 n 번째 까지 고장시점 자료를

$$x_k = \sum_{i=1}^k t_i \quad (k=1,2,\dots,n; 0 \leq x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n) \tag{5}$$

이라고 하면 데이터 집합 D_t 는 $\{n, x_1, x_2, \dots, x_n; t\}$ 와 같이 구성된다. n 번째까지 고장시점이 관찰된 고장 절단 모형일 경우에 데이터 집합 D_{x_n} 은 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 으로 구성되며 이 시간 절단 모형에서의 θ 를 모수공간이라고 표시하면 우도함수는 다음과 같이 알려져 있다[9, 10].

$$L_{NHPP}(\theta | D_{x_n}) = \left(\prod_{i=1}^n \lambda(x_i) \right) \exp(-m(x_n)) \tag{6}$$

NHPP 모형에서 테스트 시점 x_n 에서 소프트웨어 고장이 일어난다고 하는 가정 하에서 신뢰구간 $(x_n, x_n + t]$ (단, t 는 임무시간(mission time))사이에

서 소프트웨어의 고장이 일어나지 않을 확률인 신뢰도(reliability) $\hat{R}(t | x_n)$ 는 다음과 같이 됨이 알려져 있다[9].

$$\hat{R}(t | x_n) = e^{-\int_{x_n}^{x_n+t} \lambda(\tau) d\tau} = \exp[-\{m(t+x_n) - m(x_n)\}] \tag{7}$$

2.2 학습효과를 고려한 강도함수와 누적함수

소프트웨어 테스트링 작업에 있어서 학습효과는 테스트링 관리자에 의해 동일한 혹은 조작 가능한 작업이 될 수 있으므로 이러한 효과들을 어떠한 방법으로 반영하는가는 소프트웨어 신뢰성에 중요한 과정이 된다.

소프트웨어 에러들을 발견하기 위하여 자동 에러 탐색요인(autonomous errors-detected factor) γ 과 학습요인(learning factor) η 이 포함된 영향요인들(influential factors)이 고려될 수 있다. 따라서 $f(t)$ 을 t 시점에서 에러를 발견된 확률을 나타내는 강도함수이고 $F(t)$ 을 $(0, t]$ 시점까지의 누적함수라고 가정하면 영향요인들을 고려한 모형은 다음과 같이 표현 된다[8].

$$f(t) = (\gamma + \eta F(t)) (1 - F(t)) \tag{8}$$

단, $\gamma > 0, \eta > 0$.

(8)식에서 자동 에러 탐색요인 γ 는 사전에 알지 못하지만 테스트링 과정에서 테스트링 관리자가 자동적으로 에러를 발견하는 요인이지만 학습 요인 η 은 과거에 발견된 에러패턴을 바탕으로 세밀하게 에러를 발견하기 위하여 테스트링 관리자가 설정해놓은 요인을 의미한다. 한편 (8)을 다음과 같이 위험함수 형태로 변경 할 수 있다.

$$h(t) = (\gamma + \eta F(t)) \tag{9}$$

$$\text{단, } h(t) = \frac{F'(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)}$$

(9)식에서 누적분포함수와 강도함수는 다음과 같이 수정 가능하다.

$$F(t) = \frac{h(t) - \gamma}{\eta}, \quad f(t) = F'(t) = \frac{h'(t)}{\eta} \tag{10}$$

3. 제안한 이중 결합 파우어 분포 특성을 고려한 유한고장 NHPP모형

본 절에서는 와이블 분포를 확장한 이중 결합 파우어 분포(doubly bounded power law distribution)를 적용하고자 한다. 이 모형은 시간이 경과함에 따른 변화 현상 분석에 유용한 모형으로 알려져 있다. 무한고장 NHPP 모형의 평균값 함수와 강도함수는 다음과 같이 알려져 있다[11].

$$m(t) = -\ln(1 - F(t)) \tag{11}$$

$$\frac{dm(t)}{dt} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = h(t) \tag{12}$$

따라서 무한고장 모형의 강도함수는 다음과 같이 위험함수가 된다[9,10].

$$\frac{dm(t)}{dt} = \alpha + \frac{\beta\tau}{(e^t + t)^{1-\tau}} = h(t) \tag{13}$$

단, $F(t)$ 와 $f(t)$ 는 각각 분포함수와 확률밀도함수를 의미하고 $h(t)$ 는 위험함수, $\alpha(>0)$ 와 $\beta(>0)$ 는 척도모수(scale parameter)이고 $\tau(>0)$ 는 형상모수(shape parameter)이다.

본 연구에서는 이중 결합 파우어 분포의 특성을 유지하면서도 모수 추정을 용이하게 하기 위하여 형상모수 $\tau=2$ 와 척도모수 $\alpha=1$ 을 가정한 경우를 고려하고자 한다.

따라서 (10)식과 (13)을 이용하면 $\tau=2$ 인 경우에 다음과 같이 영향요인을 고려한 누적분포함수와 확률밀도함수는 다음과 같이 수정 가능하다.

$$F(t) = \frac{(1-\gamma)(2\beta e^t + 2\beta t + 1)}{\eta} \tag{14}$$

$$f(t) = F'(t) = \frac{2\beta(1-\gamma)(te^t + 1)}{\eta} \tag{15}$$

유한 고장 NHPP모형의 평균값 함수와 강도함수는 (3)식과 (4)식을 이용하면 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m(t) = \theta F(t) = \theta \frac{(1-\gamma)(2\beta e^t + 2\beta t + 1)}{\eta} \tag{16}$$

$$\lambda(t) = \theta f(t) = \theta F'(t) = \theta \frac{2\beta(1-\gamma)(te^t + 1)}{\eta} \tag{17}$$

이경우의 우도함수는 (6)식에 (16)식과 (17)식을 대입하면 다음과 같다.

$$L_{NHPP}(\theta | D_{x_n}) = \left[\prod_{i=1}^n \theta \frac{2\beta(1-\gamma)(x_i e^{x_i} + 1)}{\eta} \right] \exp \left[-\theta \left(\frac{(1-\gamma)(2\beta e^{x_n} + 2\beta x_n + 1)}{\eta} \right) \right] \tag{18}$$

단, $D_{x_n} = \{n, x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 이고 모수 추정방법은 최우추정법(MLE)을 사용하였고 최우추정법을 이용하기 위한 로그 우도함수는 (18)식과 관련하여 다음과 같이 유도된다.

$$\ln L_{NHPP}(\theta | D_{x_n}) = n \ln \theta + n \ln(1-\gamma) + n \ln \beta + n \ln 2 - n \ln \eta + \sum_{i=1}^n \ln(x_i e^{x_i} + 1) - \frac{1-\gamma}{\eta} \theta (2\beta e^{x_n} + 2\beta x_n + 1) \tag{19}$$

(19)식에서 θ 와 β 에 대하여 편미분 하면 다음과 같은 식을 만족하는 $\hat{\theta}_{MLE}$ 와 $\hat{\beta}_{MLE}$ 을 계산할 수 있다 [11].

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\theta | D_{x_n})}{\partial \theta} = \tag{20}$$

$$\frac{n}{\theta} - \left(\frac{1-\gamma}{\eta} (2\beta e^{x_n} + 2\beta x_n + 1) \right) = 0$$

$$\text{즉, } \hat{\theta} = \frac{\eta n}{(1-\gamma)(2\beta e^{x_n} + 2\beta x_n + 1)}$$

$$\frac{\partial \ln L_{NHPP}(\theta | D_{x_n})}{\partial \beta} = \tag{21}$$

$$\frac{n}{\beta} - \frac{2\theta(1-\gamma)}{\eta} (e^{x_n} + 1) = 0$$

따라서 (20)식과 (21)식을 연립하여 풀면 $\hat{\beta}_{MLE}$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{\beta}_{MLE} = \frac{1}{2(1-x_n)} \tag{22}$$

그리고 영향요인 γ 와 η 의 결정되면 (22)식을 (20)식에 대입하면 $\hat{\theta}_{MLE}$ 의 값을 추정 할 수 있다.

4. 관측 자료에 대한 모형 비교

최근에 모형에 대한 효율성을 조사하기 위한 기준으로 MSE(평균제곱오차)와 R^2 (결정계수)를 사용한다[8].

4.1 평균제곱오차(Mean square error)

평균제곱오차는 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 누적함수를 의미하고 $\hat{m}(x_i)$ 는 x_i 시점까지 평균값 함수로부터 추정된 에러의 누적개수를 의미한다. 그리고 n 은 관찰 값의 수이고 k 는 모수의 수를 의미한다.

4.2 R^2

R^2 (결정계수)는 관찰 값의 차이에 대한 설명력을 나타내는 도구로서 다음과 같이 정의 된다.

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

5. 수치적인 예

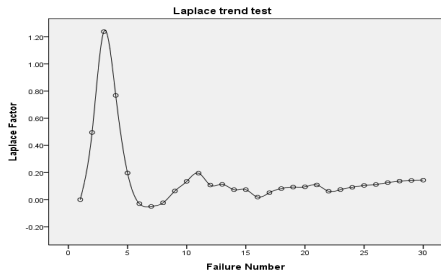
이 장에서 소프트웨어 고장 간격 시간 자료 [12](failure interval time data)를 가지고 제시하는 신뢰모형들을 분석하고자 한다. 이 자료의 고장 시간은

18.735 시간단위에 30번의 고장이 발생된 자료이며 <표 1>에 나열 되어 있다. 또 한 제시하는 신뢰 모형들을 분석하기 위하여 우선 자료에 대한 추세 검정이 선행 되어야 한다[12].

추세 분석에는 일반적으로 라플라스 추세 검정(Laplace trend test)을 사용한다. 이 검정을 실시한 결과 (그림 1)에서 라플라스 추세 검정의 결과는 라플라스 요인(Factor)이 -2와 2사이에 존재함으로써 신뢰성장(reliability growth) 속성을 나타내고 있다. 따라서 이 자료를 이용하여 신뢰 성장모형을 제시하는 것이 효율적임을 시사하고 있다[13].

<표 1> 고장 자료

Failure Number	Failure Interval (second)	Failure Time (second)
1	0.479	0.479
2	0.266	0.745
3	0.277	1.022
4	0.554	1.576
5	1.034	2.610
6	0.949	3.559
7	0.693	4.252
8	0.597	4.849
9	0.117	4.966
10	0.170	5.136
11	0.117	5.253
12	1.274	6.527
13	0.469	6.996
14	1.174	8.170
15	0.693	8.863
16	1.908	10.771
17	0.135	10.906
18	0.277	11.183
19	0.596	11.779
20	0.757	12.536
21	0.437	12.973
22	2.230	15.203
23	0.437	15.640
24	0.340	15.980
25	0.405	16.385
26	0.575	16.96
27	0.277	17.237
28	0.363	17.600
29	0.522	18.122
30	0.613	18.735



(그림 1) 라플라스 추세 검정

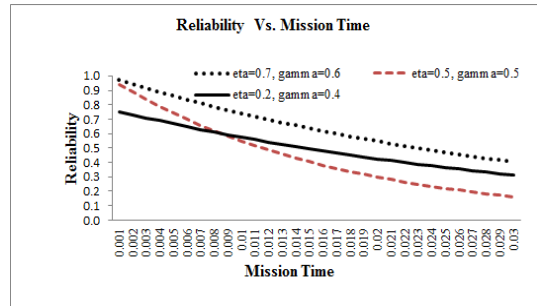
모수 추정은 최우추정법을 이용하고 모수 추정을 용이하게 하기 위하여 원래의 자료를 변수변환 ($failure\ time \times 10^{-4}$) 자료($x_n = 0.001874$)를 이용하였다. 그 결과는 <표 2>에 요약되었고 또한 학습요인 η 과 자동 에러 탐색요인 γ 에 의존한 MSE와 R^2 의 값도 추정되었다.

<표 2> η 과 γ 을 고려한 각 모형의 모수 최 우 추정 값(MLE) 및 MSE 와 R^2

Model		MLE		모형 비교	
η	γ	$\hat{\beta}_{MLE}$	$\hat{\theta}_{MLE}$	MSE	R^2
0.7	0.6	0.500939	29.88801	218.5037	0.7363
0.5	0.5		14.95787	1572.874	0.9633
0.3	0.4		11.21840	218.5139	0.9862

단, 영향요인: η, γ, MSE : 평균제곱오차, R^2 : 결정계수

이 표에서 학습요인이 자동에러발견요인보다 클 경우가 같거나 작은 경우보다 효율적 모형으로 나타나고 있다. 그리고 설명력 측면에서는 결정계수 값이 0.7보다 크게 나타나 실제 값과 추정된 값에 대한 차이의 대한 설명력이 높지만 학습요인보다는 자동에러 발견요인이 증가 할수록 설명력이 높게 나타나고 있다. (그림 1)의 신뢰도 그림에서 보여 주듯이 임무시간이 지남에 따라 완만히 감소하는 형태를 보여 주지만 학습요인이 자동에러발견요인보다 클 경우가 같거나 작은 경우보다 높은 신뢰도를 보이고 있다.



단, 영향요인: $\eta = \text{eta}, \gamma = \text{gamma}$

(그림 1) 임무시간에 대한 각 경우의 신뢰도

이 결과는 적합 시킨 자료에 의한 결과이기 때문에 다른 자료를 적합 시키면 모수 추정 결과는 달라질 수 있지만 학습요인 η 이 자동 에러 탐색요인 γ 보다 큰 경우가 대체적으로 효율적인 모형을 확인할 수 있어서 이중 결합 파워어 분포모형도 이 분야에서 학습요인을 고려한 모형이 효율적 모형으로 선택 될 수 있음을 보여주고 있다.

한편, 보안을 강화하기위해 비용을 들이면 들일수록 보안사고로 인한 잠재적 피해액은 줄어든다. 그러나 일정수준이 지나면 잠재적 피해액 보다 보안을 위한 비용이 더욱 많이 발생할 수 있다. 보안책임자는 최소한의 비용으로 최대한 잠재적 보안피해액을 줄이도록 노력해야 한다[14].

따라서 학습요인과 에러 탐색요인을 사전 정보로 활용하면 잠재적 보안피해액을 줄 일 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

대용량 소프트웨어가 수정과 변경하는 과정에서 결점의 발생을 거의 피할 수 없는 상황이 현실이다. 따라서 소프트웨어 관리자들이 소프트웨어 및 검사 도구에 효율적인 학습 과정을 이용한 NHPP 소프트웨어 모형에 대하여 연구 하였다. 사전에 알지 못하지만 자동적으로 발견되는 에러를 고려한 영향요인과 사전 경험에 의하여 세밀하게 에러를 발견하기 위하여 테스트 관리자가 설정해놓은 요인인 학습효과의 특성에 대한 문제를 비교 제시 하였다.

따라서 적합 시킨 자료에 의한 결과이기 때문에 다른 자료를 적합 시키면 모수 추정 결과는 달라질 수 있지만 학습요인이 자동 에러 탐색요인보다 큰 경우가 대체적으로 효율적인 모형임을 확인 할 수 있어서 이중 결합 파우어 분포모형도 이 분야에서 효율적 모형으로 선택 될 수 있음을 보여주고 있다. 경우에 따라서는 왜도와 첨도 측면에서 효율적인 카과 분포, 지수화지수분포 등 업데이트된 분포에 대한 적용 문제를 비교 분석하는 연구도 가치 있는 일이라 판단되고 이 연구를 통하여 소프트웨어 개발자들은 수명분포에 의존한 학습요인을 파악 하는데 어느 정도 도움을 줄 수 있으리라 사료 된다.

참고문헌

- [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 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, 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.135-141, 2003.
- [6] Pham H, Zhang X. "NHPP software reliability and cost models with testing coverage", *Eur J Oper Res*, 145, 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] J. F. Lawless. *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*. John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [10] L. Kuo and T. Y. Yang. "Bayesian Computation of Software Reliability". *Journal of the American Statistical Association*, Vol.91, pp. 763-773, 1996.
- [11] Preeti Wanti Srivastava and Nidhi Jain, "Reliability Prediction During Development Phase of a System", *Quality Technology & Quantitative Management* Vol. 8, No. 2, pp. 111-124, 2011
- [12] Y. HAYAKAWA and G. TELFAR "Mixed Poisson-Type Processes with Application in Software Reliability", *Mathematical and Computer Modelling*, 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] <http://ko.wikipedia.org/wiki/>(2013년 3월 17일 방문)

————— [저 자 소 개] —————



김 희 철(Hee-cheul Kim)

1992년 2월 동국대학교 통계학과
졸업(이학석사)

1998년 8월 동국대학교 통계학과
졸업(이학박사)

2005-현재 남서울대학교
산업경영공학과 교수

email : kim1458@nsu.ac.kr



김 경 수(Kyung-soo Kim)

1991년 순천향대학교 전산학과
졸업(공학박사)

2005년~2006년 Virginia
Common-wealth

University(객원교수)

1998년~현재 백석문화대학교
인터넷정보학부 교수

email :kkskim@bscu.ac.kr