변화점을 갖는 불완전수정 소프트웨어 신뢰도 성장모형 연구

남경현*† · 김도훈*

* 경기대학교 응용정보통계학과

An Imperfect Debugging Software Reliability Growth Model with Change-Point

Kyung H. Nam*† · Do Hoon Kim*

* Department of Applied Information Statistics, Kyonggi University

Key Words : Software Reliability Growth Model, NHPP, Imperfect Debugging, Testing-Domain Function, Mean Value Function, Change-point

Abstract

In this paper, we propose a software reliability growth model (SRGM) based on the testing domain, which is isolated by the executed test cases. This model assumes an imperfect debugging environment in which new faults are introduced in the fault-correction process. We consider that the fault detection rate of NHPP model is changed in the proposed SRGM. We obtain the maximum likelihood estimate, and compare goodness-of-fit with another existing software reliability growth model.

1. 서 론

최근 컴퓨터 시스템 상에서 안전성 제어의 역할 및 중요성이 점차 증가하고 있는 추세에서 소프트웨어 제품의 고품질화는 소프트웨어 개발자뿐만 아니라 사용자에게도 중요한 요소로 작용하고 있다. 이중 소프트웨어 신뢰성은 이들의 가장 기본적인 관심대상이 되었다. 소프트웨어 신뢰성이란 소프트웨어 시스템의 중요한 품질속성으로 소프트웨어가 의도하는 기능을 제대로 수행하는가를 평가하는 것이며, 이 속성을 정량적으로 측정하는 측도중의 하나가 소프트웨어 신뢰도이다. 이러한 소프트웨어 시스템의 신뢰도를 측정하고 평가하는 일이 소프트웨어 개발에서 중요한 문제로 대두되고 있으며, 소프트웨어 품질 보증 및 보전에 대한 관심도 점차 증대되고 있다. 일반적으로 소프트웨어 개발과정은 네 단계로 구성되어 있다 : 명세서(specification), 설계(design), 코딩(coding) 및 시험(testing)(Pham, 1993). 소프트웨어 결함은 소프트웨어 개발의 마지막 단계인 시험단계(testing phase)에서 탐지되고 수정되며, 이러한 결함 발견현상은 소프트웨어 신뢰도 성장모형(software reliability growth model : SRGM)으로 기술할 수 있다.

지난 20여년 동안 다양한 통계적 모형들이 소프트웨어 신뢰도를 평가하기 위해 제안되어 왔다. 이중 비동질적 포아송 과정(nonhomogeneous Poisson process : NHPP)에 기초한 소프트웨어 신뢰도 성장모형은 실제적인 소프트웨어 신뢰성 공학 면에서 매우 성공적인 이론이라는 것이 증명되었다(Musa et al., 1987). 대부분의 SRGM들은 다양한 가정을 통하여 모형을 전개하는데, 결함발생 시 수정과정에서 모든 결함이 즉시 수정 및 제거되고 새로운 결함이 시스템에 도입되지 않는다는 것이다. 이러한 결함 수정 활동을 완전 수정(perfect debugging)이라 한다.

† 교신저자 knam@kyonggi.ac.kr

그러나 완전 수정의 가정은 실제 소프트웨어 시험과정이나 운영과정에서 비현실적인 면이 많다. 즉, 시험과정이나 운영과정상에서 수정시 결함을 수정하지도 못하고 새로운 결함이 추가적으로 도입되는 불완전 수정 환경을 간주하여 모형을 전개하는 것이 타당할 것이다(Ohba, 1984; Yamada, Tokuno and Osaki, 1992; Pham, 1993).

또 다른 소프트웨어 신뢰도 성장모형의 기본 가정 중의 하나는 결함발견율과 관련된 가정이다. 많은 NHPP SRGM들은 각각의 결함이란 서로 독립적이고 확률적으로 발생하는 것으로, 결함탐지과정동안 동일한 분포에 따라 발생한다(Musa et al., 1987). 그러나 더 현실적인 상황 하에서 결함분포는 여러 요인 즉, 작업환경, 시험전략 및 작업할당과 같은 요인들에 의해 영향을 받을 수 있다. 이러한 요인들은 소프트웨어 시험단계 동안 변화하며, 이들은 소프트웨어 고장강도함수(failure intensity function)가 비단조적으로 증가하거나 감소하는 결과를 나타낼 수 있다. 이를 변화점 문제(change-point problem)라 하며 Zhao(1993), Chang(1997), Shyur(2003) 등에 의해 연구되었다.

본 논문에서는 시험영역에 기초한 불완전수정과 변화점 문제를 동시에 고려한 시험영역(testing-domain-dependent)에서의 NHPP SRGM을 제안한다. 이와 같은 특징들은 일반적인 SRGM보다 결함탐지현상을 더 현실적으로 고려한 모형이다. 이를 위해 SRGM에서의 모수를 추정하고, 실제적인 결함자료를 이용한 수치예제를 통하여 모수 추정값을 도출하며, 기존 SRGM과의 모형 적합도 평가를 수행하였다.

다음은 본 논문에서 사용되는 기호를 요약한 것이다.

• 기 호

- $N(t)$ 시간 t까지 탐지된 누적 결함수를 나타내는 계수과정(counting process)
- a 소프트웨어 내의 초기 결함수
- $a(t)$ 소프트웨어 시스템 내에 잠재되어 있는 누적 결함수
- b 결함 발견율
- τ 결함 발견율의 변화점
- β 결함 도입율
- v 시험영역 성장율
- $u(t)$ 불완전수정 시험영역 함수, 임의의 시점 t에서 격리된 시험영역 내 존재하는 탐지 가능한 총 결함수
- $m(t)$ 평균값 함수, 시간 t까지 탐지된 기대누적결함수
- $\lambda(t)$ 강도함수, 시간 t에서의 순간결함 탐지율

2. 시험영역 함수

2.1 시험영역함수

Fujiwara and Yamada(2003)는 소프트웨어 시스템 내에 격리된 시험영역(isolated testing-domain)과 시험에 의해 탐지 가능한 결함 수와의 관계를 수리적으로 나타내기 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다.

1) 결함수정활동에서 새로운 결함이 도입되므로 소프트웨어 시스템에 잠재되어 있는 누적 결함의 수는 증가한다.
2) 시험영역 내에 내재되어 있는 결함의 수는 균일하게 분포되어 있다.
3) 시험영역 내에 존재하는 결함수의 증가율은 임의의 시간 t에서 격리된 시험영역 밖의 소프트웨어 시스템 내에 남아있는 결함의 수에 비례한다.

이러한 가정들로부터 다음과 같은 미분방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{du(t)}{dt}=v[a(t)-u(t)],\ (v>0)$$
$$\frac{da(t)}{dt}=\beta\frac{du(t)}{dt},\quad a(0)=a,\quad u(0)=0. \tag{1}$$

여기서 v는 시험영역 성장율이고, $u(t)$는 임의의 시간 t에서 격리된 시험영역 내 존재하는 탐지 가능한 총 결함수를 나타내며, $a(t)$는 소프트웨어 시스템에 잠재되어 있는 누적 결함수를 나타낸다. 또한 a는 초기 결함수를 나타내며 β는 결함수정 활동 내 결함 도입율을 나타낸다. 결론적으로 위 미분방정식을 풀면 식 (2)와 같은 $u(t)$를 얻게 되며, 이를 불완전 수정 시험영역함수(Imperfect Testing-Domain Function : *Imperfect T-DF*)라 한다.

$$u(t)=\frac{a}{1-\beta}(1-\exp[-(1-\beta)vt]),$$
$$(\beta\neq 1, 0<\beta<1, a>0). \quad (2)$$

2.2 변화점을 갖는 NHPP 모형

대부분의 SRGM들은 결함 발견율이 상수이거나 단조적으로 증가하는 함수로 가정한다. Yamada et al.(1983)은 Goel and Okumoto(1979) 모형을 수정하여 학습효과로 인한 수정과정에서의 결함 발견율이 증가하는 함수로 가정하였다. 그러나 결함 발견율은 시험전략과 자원배분과 같은 많은 요인들로부터 영향을 받을 수 있다. 소프트웨어 시험과정 동안 잠재적인 결함발견함수는 특정한 시점 τ에서 변화가 가능하며, 이를 변화점이라 한다. 따라서 소프트웨어 신뢰도 모형에서 변화점 문제를 고려한다면 보다 더 현실적인 상황을 반영한 모형을 세울 수 있다.

또한 Zhao(1993)는 변화점 배분을 추정하기 위해 Jelinski and Moranda(1972)의 모형을 변형하였다. Chang(1997)은 NHPP SRGM의 변화점 문제를 고려하였다. 여기서 미지의 모수 τ가 변화점이 된다. Chang(1997)의 모형에서 결함 발견율은 다음과 같이 정의된다.

$$b(t)=\begin{cases}b_1, & 0\le t\le\tau,\\ b_2, & t>\tau.\end{cases} \quad (\tau : \text{변화점})$$

가정으로부터 평균값함수 $m(t)$, 그리고 강도함수 $\lambda(t)$를 도출할 수 있다.

$$m(t)=\begin{cases}a(1-e^{-b_1t}), & 0\le t\le\tau,\\ a(1-e^{-b_1\tau-b_2(t-\tau)}), & t>\tau,\end{cases} \quad (3)$$
$$\lambda(t)=\frac{dm(t)}{dt}=\begin{cases}ab_1e^{-b_1t}, & 0\le t\le\tau,\\ ab_2e^{-b_1\tau-b_2(t-\tau)}, & t>\tau.\end{cases}$$

3. 소프트웨어 신뢰도 성장모형

소프트웨어 개발과정동안 결함발견과 수정/제거 활동은 기존의 명세서의 절차에 따라서 실행된다. 본 장에서는 불완전 시험영역함수와 2.2절에서 논의된 변화점 문제에 근거한 NHPP SRGM을 제안한다. 모형전개를 위해 소프트웨어 신뢰도 성장모형에 대해 다음과 같이 가정한다.

1) 새로운 결함은 결함수정활동을 통해 도입된다.
2) 발견된 결함은 항상 격리된 시험영역 내에 존재한다.
3) 격리된 시험영역의 비율은 시험을 실시함에 따라 증가한다.
4) 작은 구간 $(t, t+\Delta t]$내에 발견된 결함수는 임의의 시간 t에서 격리된 시험영역 내에 남아있는 결함의 수에 비례한다.
5) 결함발견율은 변화점 τ에서 변한다.

$$b(t)=\begin{cases}b_1, & 0\le t<\le\tau,\\ b_2, & t>\tau.\end{cases}$$

선행 연구에 의하면, 모수 τ는 알 수 없기 때문에 결함자료로부터 추정된다(Zhao, 1993; Hinkley, 1970; Chang, 1997). 그러나 시험과정의 전략이나 자원 배분으로 인하여 결함발견과정 동안 모든 시간의 추이를 알 수 있기 때문에 변화점 τ는 주어지는 것이 더욱 타당할 것으로 판단한다.

그러므로 변화점 τ는 특정한 지점으로 추정되는 것이 아니라 미리 주어지는 상수로 가정할 수 있다(Shyur, 2003). 따라서 새로운 평균값함수를 얻기 위한 다음과 같은 미분방정식을 유도 할 수 있다.

$$\frac{dm(t)}{dt}=b(t)[u(t)-m(t)], m(0)=0 \quad (4)$$

여기서, $u(t)$는 식 (2)에서 정의된 *Imperfect T-DF* 이다.

도출된 가정 하에서 식 (4)를 풀면 평균값함수 $m(t)$와 강도함수 $\lambda(t)$는 각각 다음과 같다.

$$m(t)=\begin{cases}\dfrac{a}{1-\beta}(1-e^{-b_1t})\\ +\dfrac{ab_1}{1-\beta}\dfrac{1}{(1-\beta)v-b_1}(e^{-(1-\beta)vt}-e^{-b_1t}), 0\le t\le\tau\\ \dfrac{a}{1-\beta}(e^{-(1-\beta)v\tau}-e^{-(1-\beta)vt})+m(\tau)-e^{-b_2(t-\tau)},\\ t>\tau\end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda(t)=\begin{cases}\dfrac{ab_1}{1-\beta}e^{-b_1t}\\ +\dfrac{ab_1}{1-\beta}\dfrac{1}{(1-\beta)v-b_1}(b_1e^{-b_1t}-(1-\beta)ve^{-(1-\beta)vt}),\\ 0\le t\le\tau\\ ave^{-(1-\beta)vt}+b_2e^{-b_2(t-\tau)}, \quad t>\tau,\end{cases} \quad (6)$$

위 모형은 한 종류의 결함문제를 해결하기 위해서 사용된다. 그러나 사용자 과실 역량을 평가하기 위한 가혹 조건을 기본으로 소프트웨어 결함은 다양한 종

류로 분류된다. 따라서 위 평균값함수는 결함유형에 따라 다음과 같이 확장될 수 있다.

$$m(t)=\sum_{i\in \text{alltypes of fault}} m_i(t),$$

$$m_i(t)=\begin{cases}\dfrac{ap_i}{1-\beta_i}(1-e^{-b_{i,1}t}) & \\ +\dfrac{ab_{i,1}}{1-\beta_i}\dfrac{p_i}{(1-\beta_i)v-b_{i,1}}(e^{-(1-\beta_i)vt}-e^{-b_{i,1}t}), & 0\le t\le \tau,\\ \dfrac{ap_i}{1-\beta_i}(e^{-(1-\beta_i)v\tau}-e^{-(1-\beta_i)vt})+m(\tau) & \\ -e^{-b_{i,2}(t-\tau)}, & t>\tau\end{cases} \quad (7)$$

여기서 p_i는 i번째 결함유형에 대한 비율이고, β_i는 i번째 결함 도입율이며, $b_{i,1}$, $b_{i,2}$는 i번째 결함유형에 대한 결함 발견율이다.

따라서 제안된 모형은 소프트웨어 신뢰도 예측을 위해 불완전수정과 변화점 뿐 아니라 다중결함유형 문제에 적용될 수 있다.

4. 수치예제

4.1 모수추정

본 논문에서 제안된 모형은 불완전수정과 변화점 문제 뿐만 아니라 다중결함유형을 포함하는 것이므로 모형의 모수를 추정하기 위해 Misra(1983)에 의해 제시된 소프트웨어 결함 데이터를 이용하였으며, 이는 <표 1>과 같다. 자료의 속성은 시험시간에 따라 탐지된 결함의 수를 측정한 것이다.

Misra에 의한 결함 자료는 3가지의 유형으로 분류된다 : critical(유형 1), major(유형 2), minor(유형 3).

Pham(1993)은 그의 모형전개를 위해 동일한 자료를 이용하여 모수추정을 하였으며, 본 논문에서는 Pham(1993)에서 추정된 모수 추정치를 사용하였다.

$$p_1=0.0173,\ p_2=0.3420,\ p_3=0.6407$$
$$\beta_1=0.5,\ \beta_2=0.2,\ \beta_3=0.05$$

평균값함수 $m_i(t)$에서 신뢰도 성장 모수 a, v와 $b_{i,1}$, $b_{i,2}$는 최우추정법에 의해 추정될 수 있다. 결함 자료 $(t_k,\ y_i(t_k))$ $(k=1,2,\cdots,n;\ 0<t_1<t_2<\cdots<t_n)$는 소프트웨어 개발 과정에서 관찰될 수 있으며, $y_i(t_k)$는 주어진 시점 $(0,\ t_k]$ 사이에서 발견된 i번째 결함유형에 대한 누적 결함수를 나타낸다. 따라서 평균값 함수 $m_i(t)$를 갖는 NHPP모형에 기초한 결합확률밀도 함수 즉, 우도함수는

$$L(a,v,b_{i,1},b_{i,2}) \quad (8)$$
$$=\prod_{i=1}^{3}\prod_{k=1}^{n}\frac{[m_i(t_k)-m_i(t_{k-1})]^{y_i(t_k)-y_i(t_{k-1})}}{(y_i(t_k)-y_i(t_{k-1}))!}\exp[-m_i(t_n)]$$

이며, $t_0\equiv 0$이다.

<표 1> 소프트웨어 결함 데이터(Misra, 1983)

시험		결함수		
주	시간	유형 1	유형 2	유형 3
1	62.5	0	6	9
2	44	0	2	4
3	40	0	1	7
4	68	1	1	6
5	62	0	3	5
6	66	0	1	3
7	73	0	2	2
8	73.5	0	3	5
9	92	0	2	4
10	71.4	0	0	2
11	64.5	0	3	4
12	64.7	0	1	7
13	36	0	3	0
14	54	0	0	5
15	39.5	0	2	3
16	68	0	5	3
17	61	0	5	3
18	62.6	0	2	4
19	98.7	0	2	10
20	25	0	2	3
21	12	0	1	1
22	55	0	3	2
23	49	0	2	4
24	64	0	4	5
25	26	0	1	0
26	66	0	2	2
27	49	0	2	0
28	52	0	2	2
29	70	0	1	3
30	84.5	1	2	6
31	83	1	2	3
32	60	0	0	1
33	72.5	0	2	1
34	90	0	2	4
35	58	0	3	3
36	60	0	1	2
37	168	1	2	11
38	111.5	0	1	9

모수 a, v, $b_{i,1}$, $b_{i,2}$에 대한 추정값은 식 (8)에서 양변에 자연로그를 취한 후, 로그우도함수를 모수 각각에 대하여 편미분하여 0을 대입하여 풀면 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a}=\frac{\partial \ln L}{\partial v}=\frac{\partial \ln L}{\partial b_{i,1}}=\frac{\partial \ln L}{\partial b_{i,2}}=0. \quad (9)$$

식 (9)로부터 Misra(1983) 자료에 대한 평균값 함수 $m_i(t)$의 모수인 a, v, $b_{i,1}$, $b_{i,2}$를 수치적인 방법에 의해 구하였으며, 이에 대한 결과는 다음과 같다.

$\hat{a}=389$, $\hat{v}=0.3844$,

$\hat{b}_{1,1}=0.000135$, $\hat{b}_{2,1}=0.000327$, $\hat{b}_{3,1}=0.000332$

$\hat{b}_{1,2}=0.000397$, $\hat{b}_{2,2}=0.000354$, $\hat{b}_{3,2}=0.000421$.

본 논문에서는 결함발견율이 변화하는 시점인 τ는 미리 주어진 시간으로 Shyur(2003)에서 제시한 $\tau=652.4$시간으로 정하였다

4.2 적합도 비교 기준

본 절에서는 선행모형과 제안모형과의 적합도를 비교하였다. 이를 위하여 SSE를 모형의 적합도 평가를 위한 기준으로 사용하였다. 우선 SSE는 다음과 같이 정의된다.

$$SSE=\sum_{i=1}^{3}\sum_{k=1}^{n}[y_i(t_k)-\widehat{m_i}(t_k)]^2 \quad (10)$$

이는 제안된 신뢰도 성장모형이 실제 결함 데이터와 일치정도를 평가할 수 있는 척도로 사용된다. <표 2>는 기존의 변화점을 고려하지 않은 불완전수정을 고려한 시험영역 SRGM과 새로운 모형의 SSE를 비교한 결과를 나타낸다.

<표 2> SSE에 기초한 NHPP SRGM의 적합도 비교

	NHPP SRGM 시험영역	
	변화점 고려함	변화점 고려하지 않음
SSE(유형 1)	31.3310	32.0986
SSE(유형 2)	702.5060	724.7550
SSE(유형 3)	1383.7966	1384.0320

<표 2>로부터 변화점 문제를 고려한 모형에서의 SSE 값이 기존 모형에서의 SSE 값보다 작은 것을 알 수 있다. 따라서 새로운 모형이 실제 결함 데이터를 잘 적합 시키고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 불완전수정과 변화점 문제에 근거한 시험영역에서의 SRGM을 제안하였다. 제안된 모형은 보다 더 현실적인 상황과 근접함을 알 수 있었으며, 이를 기존 모형과의 적합도 비교를 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Chang, I. P.(1997), *An analysis of software reliability with change-point models. NSC 85-2121-M031-003*, National Science Council, Taiwan.

[2] Fenton, N. E. and Pfleeger, S. L.(1997), *Software Metrics : A Rigorous and Practical Approach*, PWS Publishing Company, Boston.

[3] Fujiwara, T. and Yamada, S.(2003), "A testing-domain-dependent software reliability growth model for imperfect debugging environment and its evaluation of goodness-of-fit", *Electronics and Communications in Japan*, Part 3, Vol. 86, No. 1, pp. 11-18.

[4] Goel, A. L. and Okumoto, K.(1979), "Time-dependent error-detection rate model for software reliability and other performance measures", *IEEE Trans. on Reliability*, Vol. R-28, No. 3, pp. 206-211.

[5] Hinkley, D. V.(1970), "Inference about the change-point in a sequence of random variables", *Biometrika*, Vol. 57, pp. 206-211.

[6] Misra, P. N.(1983), "Software reliability analysis", *IBM Syst. J.*, Vol. 22, pp. 262-270.

[7] Musa, J. D. and Iannino, A., Okumoto, K.(1987), *Software reliability measurement prediction application*, McGraw-Hill, New York.

[8] Ohtera, H., Yamada, S., and Narihisa, H.(1990), "Software reliability growth model for testing domain," *Trans. IEICE*, J73-D-I, pp. 170-174.

[9] Ohtera, H, Yamada, S., and Ohba, M.(1990), "Software reliability growth model with testing-domain and comparison of goodness-of-fit", *Int. Symp. Reliability and Maintainability*, pp. 289-294.

[10] Pham, H.(1993), Software reliability assessment : Imperfect debugging and multiple failure types in software development, EG&G-RAMM-10737, Idaho National Engineering Laboratory.

[11] Shyur, H. J.(2003), "A stochastic software reliability model with imperfect-debugging and change-point", *The Journal of System and Software*, Vol. 66, pp. 135-141.

[12] Yamada, S., Ohba, M., and Osaki, S.(1983), "S-shaped reliability growth modeling for software error detection", *IEEE Trans. on Reliability*, Vol. 12, pp. 475-484.

[13] Yamada, S., Tokuno, K., and Osaki, S. (1992), "Imperfect debugging models with fault introduction rate for software reliability assessment", *Int. J. Syst. Science*, Vol. 23, pp. 2241-2252.

[14] Zhao, M.(1993), "Change-point problems in software and hardware reliability", *Commun. Statistical-Theory Math.*, Vol. 22, pp. 757-768.