

테스트 노력에 의한 소프트웨어의 최적 발행에 관한 연구

최규식* , 김용경**

* 건양대학교 의공학과

** 건양대학교 경영정보학과

che@konyang.ac.kr

A Study on the Optimum Release of Developing Software applying Testing Efforts

Che Gyu Shik, Kin Yong Kyung

Konyang University

요 약

소프트웨어 신뢰도 성장 모델을 비동차 포아송 프로세스(NHPP)로 공식화하고, 이 모델을 이용하여 소프트웨어 신뢰도 척도에 대한 데이터 분석기법을 개발한다. 그간 여러 문헌에서 소프트웨어 신뢰도 성장 모델을 연구할 때 소프트웨어 테스트 중에 소요되는 테스트노력의 양으로서 지수함수형, 레일레이형, 웨이블형, 로지스틱형 테스트노력함수를 고려하여, 경우에 따라 이 중 하나의 적합한 형태를 사용해 왔다.

본 논문에서는 이 네 가지 형태에 대해서 최소자승평가자(LSE)와 최대가능성평가자(MLE)를 써서 파라미터를 구하는 방법을 검토gksek.

1. 서론

소프트웨어 신뢰도 성장 모델(SRGM : software reliability growth model)[1]은 테스트중에 검출되는 누적결함의 수 및 테스트 시간 간격과 관련이 있다. SRGM은 소프트웨어 시스템의 s-예측 초기 결함 내용, 임의의 테스트 시점에서의 s-예측 잔여 결함의 수, 소프트웨어의 신뢰도 등을 산출할 수 있다.

일반적으로, 소프트웨어 개발에 있어서 상당한 양의 테스트 자원이 소프트웨어의 테스트에 쓰여진다. 테스트 기간에 대한 테스트 자원의 소요곡선은 테스트 노력 곡선으로 생각할 수 있다.

야마다 등[2]은 역일시간, 테스트 노력량, 테스트 노력에 의하여 검출되는 결함의 수 사이의 관계를 명시적으로 기술하는 새롭고도 단순한 소프트웨어 신뢰도 성장모델을 제안하였다. 그들은 소프트웨어 성장에서 테스트 노력의 영향과 관련된 소프트웨어 신뢰도 성장 모델을 제안한 것이다. 그들은 시간종속적 레일레이와 지수형 곡선을 이용한 테스트노력소요량 거동을 기술하였다. 많은 연구가들의 연구에서는 테스트 단계의 테스트 자원의 소모율은 일정한 것으로 가정하거나 또는 그러한 테스트 노력을 고려하지도 않았다. 여러 참고 문헌에서 그 노력지수(실행시간)가 소프트웨어 신뢰도 모델링에서 역일시간보다 더 좋다는 것을 보여주고 있다. 관찰된 신뢰도 성장곡선의 형상이 테스트 노력의 시간분포에 강하게 의존하기 때문이다. 또 여러 참고문헌에서는 역일테스트, 테스트 노력량, 테스트 노력에 의하여 검출되는 결함의 수 사이의 관계를 설명하는 SRGM을 제안하였다.

소프트웨어 신뢰도 모델링 분야에서는 그 노력이 자주 전통적인 지수함수, 레일레이함수 또는 웨이블 곡선으로 기술된다. 또한, 야마다[2] 등은 일반적인 테스트 노력에 대한 파라미터 산출법을 제시하고자 하였으며, 야마다는 또 다른 문헌[3]에서 웨이블 테스트노력을 적용한 경우의 신뢰도 성장모델을 이용하여 파라미터 산출법을 제시하였고, Syed A. Hossain 등[4]은 로지스틱형 함수와 곱페르즈형 함수를 가지는 테스트 노력에 대한 파라미터 산출법을 연구하였다.

한편, 신뢰도와 비용을 동시에 고려한 연구로서는 Okumoto와 Goel[5]이 전체 평균 소프트웨어 비용을 최소화시키는 비용-최적 SRP(software reliability process)를 발표한 논문이 있다. Yamada와 Osaki[6]는

전체 평균 비용을 최소화시키고 소프트웨어 신뢰도를 만족시키는 전체평균비용-신뢰도-최적 SRP를 도입하였다. 이러한 연구결과를 참조하여 Hou, Kuo, Chang[7]은 지수 곡선과 로지스틱 곡선에 적용하는 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 지금까지 제안된 지수함수형, 레일레이형, 웨이블형, 로지스틱형 테스트노력의 시간종속 거동을 설명한다. 소프트웨어 테스트에서 결함 검출비가 현재의 내재 결함수에 비례하고, 임의의 테스트 시간에서 그 비례가 현재의 테스트 노력 여하에 달려 있다는 것을 가정하여 비동차 포아송 과정 (Non-Homogeneous Poisson Process ; NHPP)[4]에 바탕을 둔 신뢰도 성장모델을 개발한다. 그리고, 소프트웨어 개발에서부터 수명이 다할 때까지의 각종 비용을 고려하여 이를 최소로 하면서 목표신뢰도를 만족시키는 최적 발행 기법에 대해서 연구를 한다.

2. 테스트 노력 함수

2.1 평균치 함수 및 신뢰도

$R(x|t)$ 는 시각 t 에서 최종적으로 결함을 발견하여 수정한 후 x 유닛의 경과시간동안 새로운 결함이 발견되지 않을 확률이다. 소프트웨어를 개발하여 결함테스트를 하면 할수록 결함을 발견하여 수정하는 빈도가 작아지므로 신뢰도가 성장되며, 결함 수정 후 경과시간이 길어지면 질수록 결함 발견 확률이 높아지기 때문에 소프트웨어의 신뢰도는 낮아진다.

소프트웨어를 시각 t 에서 발행하는 경우, 발견되는 누적 분포는 평균치 함수

$$m(t) = a(1 - e^{-rW(t)}) \quad (2.1)$$

이므로,

$$m(t+x) = a \cdot e^{-rW(t)} \cdot (1 - e^{-rW(x)}) + m(t) \quad (2.2)$$

로서,

$$\begin{aligned} R(x|t) &= \exp[-m(t+x) + m(t)] \\ &= \exp[-a \cdot e^{-rW(t)}(1 - e^{-rW(x)})] \end{aligned} \quad (2.3)$$

이 된다. 목표 신뢰도를 $R(x|T) = R_0$ 라 하면

$$W^*(t) = \frac{1}{r} \log \frac{1 - e^{-rW(x)}}{\frac{1}{a} \log \frac{1}{R_0}} \quad (2.4)$$

에서 $T^* = T$ 를 구한다.

2.2 웨이블형 함수

1) 지수함수곡선 : $(0, t]$ 에서 소요되는 누적 테스트 노력은

$$W(t) = N[1 - e^{-\beta t}] \quad (2.5)$$

로서 웨이블 함수의 $m=1$ 인 경우에 해당되며, 신뢰도는

$$R(x|t) = \exp[-a \cdot e^{-rN(1-e^{-\beta t})} \cdot (1 - e^{-rN(1-e^{-\beta x})})] \quad (2.6)$$

로 표현된다.

2) 레일레이 곡선 : 소요되는 누적 테스트 노력은

$$W(t) = N[1 - \exp^{-\frac{\beta}{2} \cdot t^2}] \quad (2.7)$$

로서 웨이블함수의 $m=2$ 인 경우에 해당된다. 신뢰도는

$$R(x|t) = \exp[-a \cdot e^{-rN(1-e^{-\frac{\beta}{2}t^2})} \cdot (1 - e^{-rN(1-e^{-\frac{\beta}{2}x^2})})] \quad (2.8)$$

로 표현된다.

3) 웨이블 곡선 : 소요되는 누적 테스트 노력은

$$W(t) = N[1 - e^{-\beta t^m}] \quad (2.9)$$

로서 웨이블 함수의 일반적인 경우, 즉 $m=3, 4, \dots$ 인 경우에 해당된다.

따라서, 신뢰도는

$$R(xt) = \exp[-a \cdot e^{-\beta x^m} \cdot (1 - e^{-\beta x^m})] \quad (2.10)$$

로 표현된다.

2.3 로지스틱형 함수

실제 테스트 노력 데이터가 여러 가지 소요 패턴을 나타내므로 때때로 테스트 노력 비용을 지수함수나 레일레이 곡선만으로 설명하기는 어렵다. 웨이블형 곡선은 일반적인 소프트웨어 개발 환경 하에서 데이터에 잘 맞지만, 그리고 소프트웨어 신뢰도 모델링에 널리 쓰이지만 $m > 3$ 일 때 공칭 피크현상을 가진다. 그 대안으로 제시된 것이 로지스틱형 테스트노력 함수이다. 이 함수는 실제 프로젝트 탐사에 의해서 보고된 바와 같이 매우 정확하다. $(0, t]$ 에서의 누적 테스트 노력 소요는

$$W(t) = \frac{N}{1 + A \cdot e^{-at}} \quad (2.11)$$

이고, 신뢰도는

$$R(xt) = \exp[-a \cdot e^{-\frac{1}{1+Ae^{-ax}} - \frac{1}{1+A}}] \cdot (1 - e^{-\frac{1}{1+Ae^{-ax}} - \frac{1}{1+A}})] \quad (2.12)$$

로 표현된다.

웨이블형 테스트 노력 함수와 비교하여 로지스틱 테스트노력 함수인 경우 $W(0) \neq 0$ 이다. 공정이 때때로 확인하기 힘든 소프트웨어 개발의 초기단계에 웨이블형 곡선과 $W(t)$ 와의 차이점이 존재한다. 그리고 적용된 테스트 노력의 양을 기록하기 위한 공식적인 계수 공정절차가 수립되지 못한 곳에서도 차이가 난다.

현재의 테스트 노력 소요량은 $W(t)$ 의 미분치로서

$$w(t) = \frac{dW(t)}{dt} = \frac{NAa \cdot \exp(-at)}{[1 + A \cdot \exp(-at)]^2} = \frac{NAa}{[\exp(\frac{at}{2}) + A \cdot \exp(-\frac{at}{2})]^2} \quad (2.13)$$

와 같이 표현되며, 이 양은 $t = \frac{1}{a} \log A$ 일 때 최대치 $\frac{NA}{4}$ 를 중심으로 좌우 대칭형이다.

3. 파라미터 산출법

3.1 산출 방법

위의 각 경우에서 정의된 테스트노력함수에서 파라미터 N, A, a, β 는 최소자승법(LSE)으로 산출한다. LSE는 실제로 관찰/획득한 것과 예측한 것 사이의 차이를 제곱해서 더한 총값을 최소화하는 것이다. LSE는 중간 크기의 표본에 최적의 것으로 알려지고 있으며, 최적점 산출을 제공한다. 최소자승법을 적용하기 위한 산출 공식 $S(N, A, a)$ 은 다음과 같다.

$$S(N, A, a) = \sum_{k=1}^n [W_k - W(t_k)]^2 \quad (3.1)$$

$W_k = (0, t]$ 기간동안 실제로 소요되는 누적 테스트 노력

$W(t_k) =$ 테스트 노력 함수에 의해서 산출된 누적 테스트 노력

비동차포아송과정(NHPP)의 표준이론으로부터 임의의 $t \geq 0, x > 0$ 에서

$$\Pr \{N(t+x) - N(t) = k\} = \frac{\{m(t+x) - m(t)\}^k}{k!} e^{-m(t+x) + m(t)} \quad (3.2)$$

이므로, 여기에 $m(t+x)=m(t_k), m(t)=m(t_{k-1}), k=m_k-m_{k-1}$ 를 대입하면

$$\Pr \{N(t_k) - N(t_{k-1}) = m_k - m_{k-1}\} = \frac{\{m(t_k) - m(t_{k-1})\}^{m_k - m_{k-1}}}{(m_k - m_{k-1})!} e^{-m(t_k) + m(t_{k-1})} \quad (3.3)$$

$m(t)$ 를 가지는 NHPP의 미지파라미터 a 와 r 에 대한 조인트 pmf 즉, MLE 함수는

$$L = \Pr \{N(t_i) = m_i, i=1, \dots, n\} = \prod_{k=1}^n \frac{[m(t_k) - m(t_{k-1})]^{(m_k - m_{k-1})}}{(m_k - m_{k-1})!} e^{-(m(t_k) - m(t_{k-1}))} \quad (3.4)$$

로 표시되며, 여기에 대수를 취하여 a, r 에 관하여 편미분한다.

$$a = \frac{m_n}{1 - e^{-rW^*(t_n)}} = \frac{m_n}{1 - \phi_n} \quad (3.5)$$

$$\text{여기서, } \phi_k = e^{-rW^*(t_k)} \quad (3.6)$$

이고 또한,

$$aW^*(t_n)\phi_n = \sum_{k=1}^n (m_k - m_{k-1}) \frac{-W^*(t_{k-1})\phi_{k-1} + W^*(t_k)\phi_k}{\phi_{k-1} - \phi_k} \quad (3.7)$$

에서 r 을 구한다.

3.2 각 경우의 파라미터 산출

1) 지수함수형

$$S_1(N, \beta) = \sum_{k=1}^n \{W_k - N(1 - e^{-\beta t_k})\}^2 \quad (3.8)$$

이므로

$$\sum_{k=1}^n \{W_k - N(1 - e^{-\beta t_k})\} t_k e^{-\beta t_k} = 0 \quad (3.9)$$

을 만족하는 β 값을 구한다.

$$a = \frac{m_n}{1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta t_n})}} \quad (3.10)$$

를 구한다.

$$\begin{aligned} & aN(1 - e^{-\beta t_n}) e^{-rN(1 - e^{-\beta t_n})} \\ &= \sum_{k=1}^n (m_k - m_{k-1}) \cdot \\ & \frac{-N(1 - e^{-\beta t_{k-1}}) e^{-rN(1 - e^{-\beta t_{k-1}})} + N(1 - e^{-\beta t_k}) e^{-rN(1 - e^{-\beta t_k})}}{e^{-rN(1 - e^{-\beta t_{k-1}})} - e^{-rN(1 - e^{-\beta t_k})}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

에서 r을 구한다.

2) 레일레이형

$$S_2(N, \beta) = \sum_{k=1}^n \{W_k - N(1 - e^{-\beta/2t_k^2})\}^2 \quad (3.12)$$

이므로

$$\sum_{k=1}^n \{W_k - N(1 - e^{-\beta/2t_k^2})\}(1 - e^{-\beta/2t_k^2}) = 0 \quad (3.13)$$

을 만족하는 N값을 구한다.

$$\sum_{k=1}^n \{W_k - N(1 - e^{-\beta/2t_k^2})\}t_k^2 e^{-\beta/2t_k^2} = 0 \quad (3.14)$$

을 만족하는 β 값을 구한다

$$a = \frac{m_n}{1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta/2t_n^2})}} \quad (3.15)$$

를 구한다.

$$aN(1 - e^{-\beta/2t_n^2})e^{-rN(1 - e^{-\beta/2t_n^2})} = \sum_{k=1}^n (m_k - m_{k-1}) \cdot \frac{-N(1 - e^{-\beta/2t_{k-1}^2})e^{-rN(1 - e^{-\beta/2t_{k-1}^2})} + N(1 - e^{-\beta/2t_k^2})e^{-rN(1 - e^{-\beta/2t_k^2})}}{e^{-rN(1 - e^{-\beta/2t_{k-1}^2})} - e^{-rN(1 - e^{-\beta/2t_k^2})}} \quad (3.16)$$

에서 r을 구한다.

3) 웨이블형

$$S_3(N, \beta, m) = \sum_{k=1}^n \{W_k - N(1 - e^{-\beta t_k^m})\}^2 \quad (3.17)$$

이므로,

$$\sum_{k=1}^n \{W_k - N(1 - e^{-\beta t_k^m})\}(1 - e^{-\beta t_k^m}) = 0 \quad (3.18)$$

을 만족하는 N값을 구한다.

$$\sum_{k=1}^n \{W_k - N(1 - e^{-\beta t_k^m})\}t_k^m e^{-\beta t_k^m} = 0 \quad (3.19)$$

을 만족하는 β 값을 구한다.

$$\sum_{k=1}^n \{W_k - N(1 - e^{-\beta t_k^m})\}t_k^{m-1} e^{-\beta t_k^m} = 0 \quad (3.20)$$

을 만족하는 m값을 구한다.

$$a = \frac{m_n}{1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta t_n^m})}} \quad (3.21)$$

를 구한다.

$$aN(1 - e^{-\beta t_n^m})e^{-rN(1 - e^{-\beta t_n^m})} = \sum_{k=1}^n (m_k - m_{k-1}) \cdot \frac{-N(1 - e^{-\beta t_{k-1}^m})e^{-rN(1 - e^{-\beta t_{k-1}^m})} + N(1 - e^{-\beta t_k^m})e^{-rN(1 - e^{-\beta t_k^m})}}{e^{-rN(1 - e^{-\beta t_{k-1}^m})} - e^{-rN(1 - e^{-\beta t_k^m})}} \quad (3.22)$$

에서 r을 구한다.

4) 로지스틱형

$$S_4(N, A, \alpha) = \sum_{k=1}^n \left\{ W_k - \frac{N}{1 + Ae^{-\alpha t_k}} \right\}^2 \quad (3.23)$$

이므로,

$$N = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{W_k}{1 + Ae^{-\alpha t_k}}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{\{1 + Ae^{-\alpha t_k}\}^2}} \quad (3.24)$$

을 만족하는 N값을 구한다.

$$\sum_{k=1}^n \left(W_k - \frac{N}{1 + Ae^{-\alpha t_k}} \right) \frac{e^{-\alpha t_k}}{\{1 + Ae^{-\alpha t_k}\}^2} = 0 \quad (3.25)$$

를 만족하는 A값을 구한다.

$$\sum_{k=1}^n \left(W_k - \frac{N}{1 + Ae^{-\alpha t_k}} \right) \frac{t_k e^{-\alpha t_k}}{\{1 + Ae^{-\alpha t_k}\}^2} = 0 \quad (3.26)$$

을 만족하는 a값을 구한다.

$$a = \frac{m_n}{1 - e^{-rN(\frac{1}{1 + Ae^{-\alpha t_n}} - \frac{1}{1 + A})}} \quad (3.27)$$

를 구한다.

$$\begin{aligned} & aN \left(\frac{1}{1 + Ae^{-\alpha t_n}} - \frac{1}{1 + A} \right) e^{-rN(\frac{1}{1 + Ae^{-\alpha t_n}} - \frac{1}{1 + A})} \\ &= \sum_{k=1}^n \{ (m_k - m_{k-1}) \cdot \\ & \left[\left\{ -N \left(\frac{1}{1 + Ae^{-\alpha t_{k-1}}} - \frac{1}{1 + A} \right) e^{-rN(\frac{1}{1 + Ae^{-\alpha t_{k-1}}} - \frac{1}{1 + A})} \right\} \right. \\ & \left. + \left\{ N \left(\frac{1}{1 + Ae^{-\alpha t_k}} - \frac{1}{1 + A} \right) e^{-rN(\frac{1}{1 + Ae^{-\alpha t_k}} - \frac{1}{1 + A})} \right\} \right. \\ & \left. + \left\{ e^{-rN(\frac{1}{1 + Ae^{-\alpha t_{k-1}}} - \frac{1}{1 + A})} - e^{-rN(\frac{1}{1 + Ae^{-\alpha t_k}} - \frac{1}{1 + A})} \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.28)$$

에서 r을 구한다.

4. 비용-신뢰도를 고려한 발행 기법

소프트웨어 프로젝트 관리자에게 있어서는 개발 후 수행중인 소프트웨어 테스트를 중단하고 시스템을 사용자에게 인계하는 최적 발행 시기를 결정하는 것이 중요하며, 이것을 최적 소프트웨어 발행 문제라고 한다. 이는 시스템의 신뢰도와 투입된 테스트자원 사이의 관계를 고려하여 공식화할 수 있다. 목표 신뢰도를 맞추면서 전체 소프트웨어 비용이 최소가 되도록 하는 것이 중요하다. 테스트 단계중의 테스트 노력 소요량 비용과 발행 전후의 결함 수정 비용을 소프트웨어 비용인자로 계산한다. 이러한 방법으로 하여 비용-신뢰도 최적 소프트웨어 발행시각에 대한 해를 구할 수 있다.

$$T^* = \max \{ T_1, T_2 \}$$

여기서, T_1 은 비용을 최저로 하는 발행시간, T_2 는 목표신뢰도를 만족하는 발행시간이다. 비용을 최저로 하면서 목표신뢰도를 맞추기 위한 최적 발행 시각은 그 두 시간 중에 큰 값을 취해야 한다는 것을 의미

한다.

4.1 비용 기준에 의한 발행 시각

본 항에서는 비용 기준에 근거하여 비용 모델을 고찰하고 발행기법을 고찰한다. 비용 기준에 의해서 산출된 소프트웨어 비용을 이용한 소프트웨어 테스트/개발 단계 기간 동안의 테스트 노력 비용과, 발행 전후의 오류 수정 비용은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 C(T) &= C_1 m(T) + C_2 [m(T_{LC}) - m(T)] + C_3 \int_0^T w(x) dx \\
 &= -(C_2 - C_1)m(T) + C_2 m(T_{LC}) + C_3 W^*(T) \\
 &= -(C_2 - C_1)a(1 - e^{-rW(T)}) + C_3 W^*(T) \\
 &\quad + C_2 a(1 - e^{-rW(T_{LC})}) \tag{4.1}
 \end{aligned}$$

최적치를 구하기 위해 이를 미분, 정리하여

$$W^*(T) = \frac{1}{r} \log \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} \tag{4.2}$$

인 조건을 만족하는 T를 구한다.

1) 지수 함수

$$\begin{aligned}
 C(T) &= -(C_2 - C_1)a[1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta T})}] \\
 &\quad + C_3 N(1 - e^{-\beta T}) + C_2 a[1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta T_{LC}})}] \tag{4.3}
 \end{aligned}$$

$$T_1 = -\frac{1}{\beta} \log \left[1 - \frac{1}{rN} \log \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} \right] \tag{4.4}$$

i) $1 < \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} < e^{rN(1 - e^{-\beta T_{LC}})}$

이때 유한하고도 유일한 해가 존재하며, 그 값은 (4.4)와 같다.

ii) $0 < \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} < 1$ 이면 $T_1 = 0$ 이다.

iii) $\frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} > e^{rN(1 - e^{-\beta T_{LC}})}$ 이면 $T_1 = T_{LC}$ 이다.

2) 레일레이 함수

$$\begin{aligned}
 C(T) &= -(C_2 - C_1)a[1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta/2 T^\beta})}] \\
 &\quad + C_3 N(1 - e^{-\beta/2 T^\beta}) + C_2 a[1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta/2 T_{LC}^\beta})}] \tag{4.5}
 \end{aligned}$$

$$T_1 = \left\{ -\frac{2}{\beta} \log \left[1 - \frac{1}{rN} \log \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} \right] \right\}^{1/2} \tag{4.6}$$

i) $1 < \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} < e^{rN(1 - e^{-\beta/2 T_{LC}^\beta})}$

이때 유한하고도 유일한 해가 존재하며, 그 값은 (4.6)과 같다.

ii) $0 < \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} < 1$ 이면 $T_1 = 0$ 이다.

iii) $\frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} > e^{rN(1 - e^{-\beta/2 T_{LC}^\beta})}$ 이면 $T_1 = T_{LC}$ 이다.

3) 웨이블 함수

$$C(T) = -(C_2 - C_1)a[1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta T})}] + C_3N(1 - e^{-\beta T}) + C_2a[1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta T})}] \quad (4.7)$$

$$T_1 = \left\{ -\frac{1}{\beta} \log \left[1 - \frac{1}{rN} \log \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} \right] \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (4.8)$$

i) $1 < \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} < e^{rN(1 - e^{-\beta T_{LC}})}$

이때 유한하고도 유일한 해가 존재하며, 그 값은 (4.8)과 같다.

ii) $0 < \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} < 1$ 이면 $T_I = 0$ 이다.

iii) $\frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} > e^{rN(1 - e^{-\beta T_{LC}})}$ 이면 $T_I = T_{LC}$ 이다.

4) 로지스틱 함수

$$C(T) = -(C_2 - C_1)a \left[1 - e^{-rN \left(\frac{1}{1 + Ae^{-aT}} - \frac{1}{1 + A} \right)} \right] + C_3N \left(\frac{1}{1 + Ae^{-aT}} - \frac{1}{1 + A} \right) + C_2a \left[1 - e^{-rN \left(\frac{1}{1 + Ae^{-aT_{LC}}} - \frac{1}{1 + A} \right)} \right] \quad (4.9)$$

$$T_1 = -\frac{1}{a} \log \left[\frac{1}{\frac{A}{1 + A} + \frac{A}{rN} \log \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3}} - \frac{1}{A} \right] \quad (4.10)$$

로 표현된다.

i) $1 < \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} < \exp \frac{rNA(1 - e^{-aT_{LC}})}{(1 + Ae^{-aT_{LC}})(A + 1)}$

이때 유한하고도 유일한 해가 존재하며, 그 값은 (4.10)과 같다.

ii) $0 < \frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} < 1$ 이면 $T_I = 0$ 이다.

iii) $\frac{ar(C_2 - C_1)}{C_3} > \exp \frac{rNA(1 - e^{-aT_{LC}})}{(1 + Ae^{-aT_{LC}})(A + 1)}$ 이면 $T_I = T_{LC}$ 이다.

4.2 목표 신뢰도에 의한 발행 시각

3항에서 구한 파라미터를 적용하여 각각의 경우에 대한 최적 발행 시각을 나타내면 다음과 같다.

1) 지수함수형

발행시각을 $t = T$ 라 하고, 목표신뢰도를 $R(x|T) = R_0$ 라 하면

$$R_0 = \exp[-ae^{-rN(1 - e^{-\beta T})(1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta T})})}] \quad (4.11)$$

에서

$$T = T_2 = -\frac{1}{\beta} \log \left[1 + \frac{1}{rN} \log \frac{\log \frac{1}{R_0}}{a\{1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta T})}\}} \right] = -\frac{1}{\beta} \log \left[1 + \frac{1}{rN} \log \frac{\log R_0}{\log R(x|0)} \right] \quad (4.12)$$

여기서, $R(x|0) = \exp[-a(1 - e^{-rN(1 - e^{-\beta x})})]$ (4.13)

2) 레일레이형

$$R_0 = \exp[-ae^{-rN(1-e^{-\beta/2T})}(1-e^{-rN(1-e^{-\beta/2x})})] \quad (4.14)$$

에서

$$\begin{aligned} T = T_2 &= \left\{ -\frac{2}{\beta} \log \left[1 + \frac{1}{rN} \log \frac{\log \frac{1}{R_0}}{a(1-e^{-rN(1-e^{-\beta/2x})})} \right] \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ -\frac{2}{\beta} \log \left(1 + \frac{1}{rN} \log \frac{\log R_0}{\log R(x|0)} \right) \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (4.15)$$

여기서, $R(x|0) = \exp[-a(1-e^{-rN(1-e^{-\beta/2x})})]$ (4.16)

3) 웨이불형

$$R_0 = \exp[-ae^{-rN(1-e^{-\beta T})}(1-e^{-rN(1-e^{-\beta x})})] \quad (4.17)$$

에서

$$\begin{aligned} T = T_2 &= \left\{ -\frac{1}{\beta} \log \left[1 + \frac{1}{rN} \log \frac{\log \frac{1}{R_0}}{a(1-e^{-rN(1-e^{-\beta x})})} \right] \right\}^{1/m} \\ &= \left\{ -\frac{1}{\beta} \log \left(1 + \frac{1}{rN} \log \frac{\log \frac{1}{R_0}}{a(1-e^{-rW(x)})} \right) \right\}^{1/m} \\ &= \left\{ -\frac{1}{\beta} \log \left(1 + \frac{1}{rN} \log \frac{\log R_0}{\log R(x|0)} \right) \right\}^{1/m} \end{aligned} \quad (4.18)$$

여기서, $R(x|0) = \exp[-a(1-e^{-rN(1-e^{-\beta x})})]$ (4.19)

4) 로지스틱형

$$\begin{aligned} R_0 &= \exp \left[-ae^{-rN \left(\frac{1}{1+Ae^{-\beta T}} - \frac{1}{1+A} \right)} \right. \\ &\quad \left. \cdot (1-e^{-rN \left(\frac{1}{1+Ae^{-\beta x}} - \frac{1}{1+A} \right)}) \right] \end{aligned} \quad (4.20)$$

에서

$$\begin{aligned} T = T_2 &= -\frac{1}{a} \log \frac{1}{A} \left\{ \frac{1}{\frac{1}{1+A} - \frac{1}{rN} \log \frac{\log \frac{1}{R_0}}{a(1-e^{-rN(\frac{1}{1+Ae^{-\beta T}} - \frac{1}{1+A})})}} - 1 \right\} \\ &= -\frac{1}{a} \log \frac{1}{A} \left\{ \frac{1}{\frac{1}{1+A} - \frac{1}{rN} \log \frac{\log \frac{1}{R_0}}{a(1-e^{-rW(x)})}} - 1 \right\} \\ &= -\frac{1}{a} \log \frac{1}{A} \left\{ \frac{1}{\frac{1}{1+A} - \frac{1}{rN} \log \frac{\log R_0}{\log R(x|0)}} - 1 \right\} \end{aligned} \quad (4.21)$$

이다. 여기서,

$$\begin{aligned} R(x|0) &= \exp[-a(1-e^{-rN(\frac{1}{1+Ae^{-\beta x}} - \frac{1}{1+A})})] \\ &= e^{-a(1-e^{-rW(x)})} \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.3 적용 예

3항에서 연구한 NHPP 모델의 수치 적용 예를 보이기 위해서 실제적인 소프트웨어 에러 데이터로서 [5]에서 조사된 데이터집합을 가지고 다음과 같은 값을 산출하여 적용하였다.

<표 4.1> 실제 데이터

t_k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
m_k	8	16	25	37	41	46	52	59	64	80	
w_k	1	1	1	1	1	1	1	3	10	1	
tk	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
m_k	89	98	107	121	128	131	133	133	135	136	137
w_k	5	3	9	13	34	35	27	39	35	25	19

이 데이터를 이용하여 3항의 각 방정식에 의해서 각종 파라미터를 산출하면 <표 4.2>, <표4.3>과 같다.

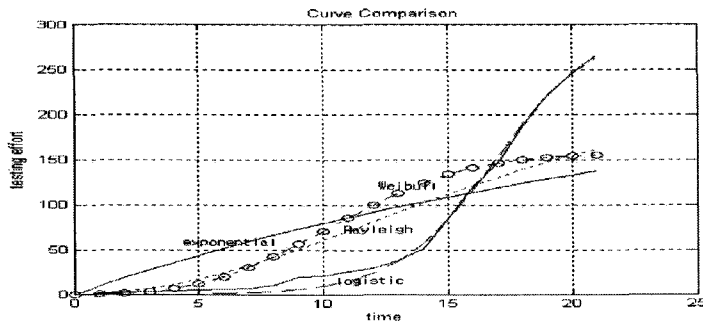
<표 4.2> 파라미터 산출(오차범위 0.001인 경우)

	지수함수형	레이레이형	웨이블형	로지스틱형
N	241.73	204.77	155.37	295.94
a	223.35	179.88	208.35	137.00
α	-	-	-	0.500977
β	0.003984	0.007031	0.000781	-
m	-	-	2.891602	-
A	-	-	-	4653.63
r	0.006935	0.008888	0.006935	0.040135

<표 4.3> 파라미터 산출(오차 범위 0.0001인 경우)

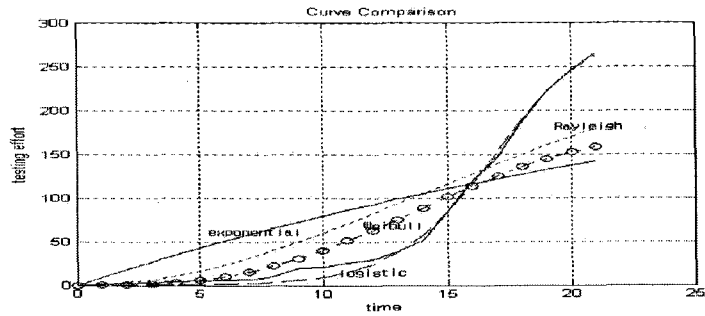
	지수함수형	레이레이형	웨이블형	로지스틱형
N	289.31	263.41	176.79	295.84
a	287.69	159.61	145.04	137.00
α	-	-	-	0.501282
β	0.003213	0.005176	0.000293	-
m	-	-	2.943054	-
A	-	-	-	4673.86
r	0.004067	0.010902	0.018226	0.039586

<표 4.2>는 오차범위가 0.001 이내로 되는 값을, <표 4.3>은 오차범위가 0.0001 이내로 되는 값을 수치해석적으로 구한 결과이다. 각 경우의 파라미터에 의한 테스트 노력곡선이 실제의 현상과 어떤 연관 관계를 가지는가를 검토하기 위하여 추이곡선을 그렸으며, 그 결과는 (그림 4.2)(오차 범위 0.001 이내), (그림 4.3)(오차 범위 0.0001 이내)과 같다.



(그림 4.2) 테스트노력곡선 비교(오차 범위 0.001)

(Fig 4.2) testing effort curve comparison(0.001 tolerance)

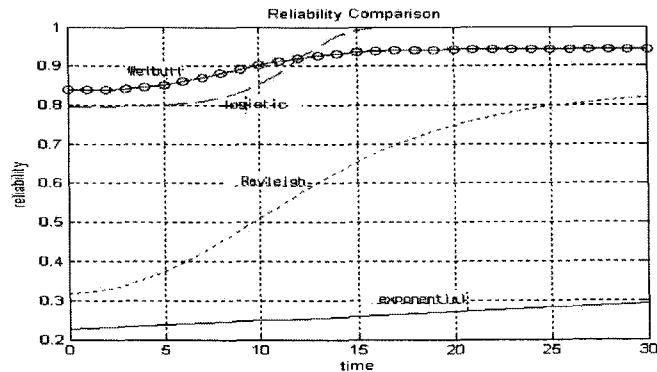


(그림 4.3) 테스트노력곡선 비교(오차 범위 0.0001)

(Fig 4.3) testing effort curve comparison(0.0001 tolerance)

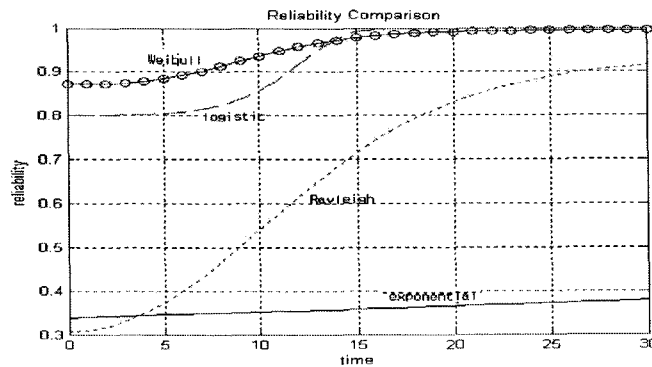
4가지 경우의 테스트 노력 곡선을 실제 관측된 데이터 곡선과 비교하였을 때, 지수함수형과 레일레이 형은 현격한 차이를 나타내고 있다. 웨이블형은 상기 두 함수에 비하여 실제와 근접하나, 테스트 시간이 길어짐에 따라 커다란 차이를 보이고 있다. 이와는 대조적으로 로지스틱형은 테스트 초창기만 약간 차이를 보이고 있으나, 테스트 시간이 경과함에 따라 실제 현상과 거의 근접한 것을 알 수 있다. 초창기에 차이가 나는 것은 테스트 초기에는 테스트 여건이나 테스트자의 숙련도 등이 미숙하거나 불확실한 이유 때문으로 사료된다.

또한, 이러한 각종 파라미터에 의한 테스트노력곡선을 이용하여 각 경우의 신뢰도 성장 곡선을 그리면 (그림 4.4), (그림 4.5)와 같다. 단, 경과시간 $x=1$ 로 가정하였다.



(그림 4.4) SRGM 비교(오차 범위 0.001)

(Fig 4.4) SRGM comparison(0.001 tolerance)

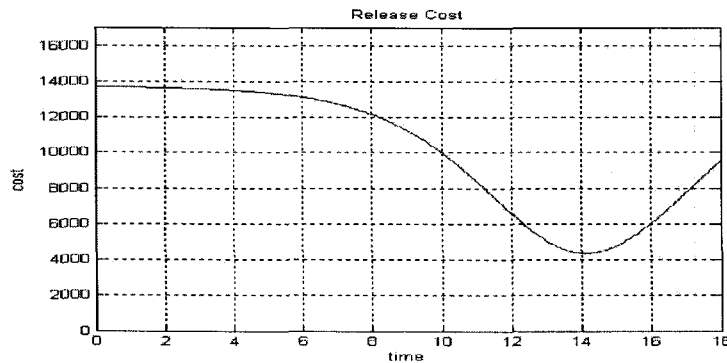


(그림 4.5) SRGM 비교(오차 범위 0.0001)

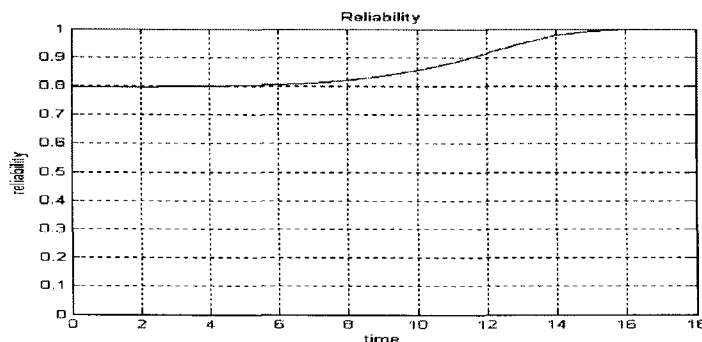
(Fig 4.5) SRGM comparison(0.0001 tolerance)

그림을 검토해볼 때 지수함수형이나 레일레이형인 경우 목표신뢰도에 이르기 어렵게 되어 있으며, 비현실적이다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 관찰된 데이터를 분석하는 가정이 불확실하기 때문이다. 웨이블형이나 로지스틱형은 S형 곡선을 나타내고 있으며, 실제 소프트웨어 성장모델(SRGM)곡선과 근접한 현상을 나타내고 있다. 목표 신뢰도를 $R_0=0.9$ 로 가정하여 오차범위 0.001이내인 경우를 적용하여 각각의 경우에 대한 발행시각을 계산한 결과, 지수함수형이나 레일레이형은 성장속도가 너무 느려서 소프트웨어의 전 수명주기를 통하여 테스트를 해도 목표신뢰도를 맞출 수 없는 것으로 검토되었다. 그러나, <표 4.1>-<표 4.3>에서 보는 바와 같이 초기 오류 데이터의 수가 300을 넘지 않는 상황을 감안할 때 이는 논리에 맞지 않는다. 한편, 웨이블형인 경우는 발행시각이 합당한 것으로 계산되었다. 이는 (그림 4.3)의 곡선을 관찰해도 그 결과가 타당함을 확인할 수 있다.

이상의 연구 결과에서 보듯 가장 정확한 경우는 로지스틱인 경우이다. <표 4.2>의 로지스틱 테스트 노력 함수의 파라미터를 가지고 $R_0=0.9$ 인 경우를 예로 들어서 계산해본 결과, 테스트 전 최초 신뢰도 $R(x|0)=79.7\%$, 비용을 기준으로 한 최적 발행시각 $T_1=14.1$, 목표신뢰도를 맞추는 최적발행시각 $T_2=11.5$ 로서 $T^*=T_1=14.1$ 이다. 이 때 예상 총 비용은 $C(T) = 4,357.7$ 이고 신뢰도는 97.9%이다. 이는 (그림 4.6), (그림 4.7)을 관찰해보아도 타당함을 알 수 있다.



(그림 4.6) 발행시각과 비용과의 관계
(Fig. 4.6) Cost vs release time



(그림 4.7) 발행시각과 신뢰도와의 관계
(Fig. 4.7) Reliability vs release time

5. 결론

본 논문에서는 상기 네 가지 경우에 대한 함수의 파라미터 산출법을 연구하고, 이러한 파라미터 산출법과 함수들이 실제와 얼마나 부합되는가를 검토하기 위하여, 실제 개발 과정을 통하여 수집한 데이터

를 가지고 각 경우에 대한 파라미터를 산출하고 이를 상호 비교하였다. 검토 결과에 의하면 지수함수형이나 레일레이형은 실제 현상과 커다란 차이를 나타내었으며, 웨이블형은 어느 정도 실제와 근접하는 특성을 나타내었다. 한편, 로지스틱형은 거의 완벽하다고 표현할 만큼 실제 현상과 잘 부합하였다.

테스트노력과 오류검출 현상이 소프트웨어 개발환경에 따라 불규칙성을 나타내는 것이 일반적이라고 할 때, 지수함수형이나 레일레이형은 이러한 현상에 융통성이 부족한 것으로 사료된다. 웨이블형은 앞의 두 가지 형에 대한 보완형으로 제안되었다고 할 만큼 융통성이 있어서 실제 현상과 유사한 특성을 나타낸다. 단, 웨이블형인 경우는 시간의 지수가 3 이상이면 문제가 있는 것으로 검토되었으므로 이를 유의할 필요가 있다. 최근에는 로지스틱형이 제안되고 있는데, 본 연구에서 비교 연구한 바에 의하면 실제 현상에 가장 부합하는 것으로 판명되었다.

그리고, 목표신뢰도를 정하고 산출된 파라미터에 의해서 각 경우의 발행시각을 계산해본 결과, 지수함수형과 레일레이형은 소프트웨어 전 수명기간동안 목표신뢰도를 만족시킬 수 없는 큰 문제점을 나타내고 있다. 이는 곡선의 융통성이 적을 뿐만 아니라, 테스트 초창기의 불규칙하고 불확실한 테스트 노력 현상 때문에 산출된 파라미터의 신뢰성이 저하되었기 때문으로 사료된다. 웨이블형이나 로지스틱형은 발행시각이 비교적 정확한 분석 결과이다.

참고문헌

- [1] C. V. Ramamoorthy, F. B. Bastani, "Software reliability - Status and perspectives", IEEE Trans. on Software Eng., vol. SE-8, pp354-371, 1982 Aug.
- [2] S. Yamada, H. Ohtera, H. Narihisa, "Software reliability growth models with testing-efforts", IEEE Trans. Reliability, vol. R-35, pp19-23, 1986 Apr.
- [3] S. Yamada, J. Hishitani, S. Osaki, "Software - Reliability Growth with a Weibull Test-Effort : A Model & Application", IEEE Trans. Reliability, vol. 42, no.1, pp100-106, 1993 March
- [4] Syed A. Hossain, Ram C. Dahiya, " Estimating the Parameters of a Non-homogeneous Poisson-Process Model for Software Reliability", IEEE Trans. Reliability, vol. 42, pp604-612, no.4, 1993 Dec.
- [5] K. Okumoto, A. L. Goel, "Optimum release time for software systems based on reliability and cost criteria", J. System software, vol. 1, pp315-318, 1980.
- [6] S. Yamada, S. Osaki, "Cost-reliability optimal release policies for software systems", IEEE Trans. on Reliability, vol. R-34, pp422-424, 1985 Dec.
- [7] Rong-Huei Hou, Sy-Yen Kuo, Yi-Ping Chang, "Optimal release policy for hyper-geometric distribution software-reliability growth model", IEEE Trans. on Reliability, vol.45, pp646-651, 1996. Dec.