

論文95-32A-6-8

소자의 수명 예측을 위한 Weibull Step-Stress Type-I Model

(Weibull Step-Stress Type-I Model to Predict the Lifetime of Device)

丁在聲*, 吳英煥*

(Jea Seong Jeong, and Young Hwan Oh)

要 約

본 논문은 소자의 수명 예측에 필요한 가속 수명 시험(accelerated life test)기간의 단축과 가속 수명 자료(accelerated life data)의 분석을 위한 step-stress type-I censoring 모델을 제안하였다. 가속 수명 자료를 얻기 위해 CMOS 14050B Hex Buffer에 대해 전압을 stress로 하는 step-stress 가속 수명 시험을 실시하였고 고장 분포와 고장 모델, 추정 방법으로는 Weibull분포, Inverse-power-law 모델, 최우추정법(maximum likelihood method)을 이용하였으며 최우추정법을 이용한 모수의 추정 과정에서 발생하는 비선형 연립방정식은 Modified-quasi-linearization 방법을 적용한 프로그램을 작성하여 반복 계산하였다. 본 논문에서 제안한 Weibull분포를 적용한 step-stress type-I censoring 모델은 소자의 고장 수명과 고장 분포를 정확하게 추정하는 동시에 가속 수명 시험에서 소요되는 시간과 장비를 절감함을 장점으로 한다.

Abstract

This paper proposes the step-stress type-I censoring model for analyzing the data of accelerated life test and reducing the time of accelerated life test. In order to obtain the data of accelerated life test, the step-stress accelerated life test was run with voltage stress to CMOS Hex Buffer. The Weibull distribution, the Inverse-power-law model and Maximum likelihood method were used. The iterative procedure using modified-quasi-linearization method is applied to solve the nonlinear equation. The proposed Weibull step-stress type-I censoring model exactly estimates the life time of units, while reducing the time of accelerated life test and the equipments of test.

I. 서 론

정상적인 환경하에서 소자의 수명 시험은 소자의 수명 정보를 획득하는데 있어서 많은 시간과 장비, 비용이 소요된다. 따라서 이같은 난점을 개선하기위해서 정상 동작 환경보다 높은 과부하를 인가하여 실험 소

수명분포에 대한 정보를 보다 빨리 획득하는 가속 수명 시험을 실시한다. 실험 소자에 인가되는 stress는 전압, 온도, 습도, 진동 등 다양하며 stress에 따라 특정한 통계적 모델이 적용된다. 가속 수명 시험의 수명 자료(accelerated life data)는 여러 통계적 모델에 적용되어 소자의 수명 예측에 필요한 수명 분포와 모수(parameter)들을 추정하게 되고 정상동작 환경에서 소자의 수명을 예측하는데 사용된다. 소자의 수명 예측에 있어서 수명 분포와 모수를 정확하게 추정하는 것이 필수적이다. 가속 수명 모델은 크게

* 正會員, 光云大學校 電子通信工學科

(Dept. of Elec. Comm. Eng. Kwangwoon Univ.)

接受日字: 1994年12月5日, 授正完료일: 1995年5月26日

constant-stress 가속 수명 모델^[1]과 step-stress 가속 수명 모델^[2,3,4]로 분류된다. constant-stress 가속 수명 모델은 실제 환경 영역에서 운용되는 stress 모델과 동일하고 고장 자료의 해석이 용이한 장점이 있으나 고장 자료를 획득하는데 있어서 많은 시간이 소요된다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 Wayne Nelson^[2]은 실험 소자에 대해 stress를 특정 시간 동안 변화시켜 인가하는 step-stress 가속 수명 모델을 제안하였다. 그러나 이 step-stress 가속 수명 모델 또한 소자의 고장 자료가 넓게 분포되어 있는 경우 가속 수명 시험 기간이 많이 소요되므로 장비와 비용의 손실을 초래한다.

본 논문은 가속 수명 시험의 기간을 단축하는 동시에 소자의 수명을 비교적 정확하게 예측하기 위해 step-stress 가속 수명 모델을 수정하여 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델을 제안하였다. 소자의 고장 분포를 Weibull분포^[5]로 설정하고 이 분포에 Inverse-power-law 모델을 적용한 다음 CMOS 14050B Hex Buffer의 고장 자료를 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델에 적용하였다. 그리고 모델 모수들은 최우추정법에 의해 추정하였다. 최우추정법을 사용하여 모수들을 추정할 때 발생하는 비선형 연립방정식은 Modified-quasi-linearization 방법^[6]을 이용한 프로그램을 작성하여 반복 계산하였고 계산 결과로 추정된 모수들을 수명 분포에 적용하여 CMOS 14050B Hex Buffer의 수명을 예측하였다.

II. 기본 이론

1. Constant-stress 가속 수명 모델

소자의 가속 수명 시험은 일반적으로 일정한 stress 상에서 실시되므로 constant-stress 가속 수명 모델은 수명 예측 모델의 일반적 형태이다. constant-stress 가속 수명 모델을 따르는 소자의 수명 분포는 다음과 같은 가정을 바탕으로 stress를 독립변수로 갖는 함수로 표현된다.

1) 모든 stress에 대해 그 수명 분포는 Weibull분포를 갖는다.

Weibull분포는 다음과 같다.

확률밀도함수(probability density function):

$$f(t) = (\beta / \theta^\beta) t^{(\beta-1)} \exp [-(t/\theta)^\beta] \quad (1)$$

누적분포함수(cumulative distributed function):

$$F(t) = 1 - \exp [-(t/\theta)^\beta] \quad (2)$$

- 2) Weibull분포의 형태 모수(shape parameter) β 는 일정하다.
- 3) Weibull분포의 크기 모수(scale parameter) θ 는 stress가 전압일 때 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\theta = 1 / (\varepsilon V^\omega) \quad (3)$$

식 (3)에서 ε, ω 는 실험 방법과 실험 소자의 특성을 나타내는 모수들이다. 식 (3)을 Inverse-power-law 모델이라고 하며 ε 는 물질 모수(Material parameter), ω 를 전력 모수(Power parameter)라고 한다.

위의 세 가지 가정을 바탕으로 시간과 모델에 대한 소자의 누적분포를 표현하면

$$F(t; V) = 1 - \exp \{ -(t\varepsilon V^\omega)^\beta \} \quad (4)$$

이 된다.

2. Step-stress 가속 수명 모델

step-stress 가속 수명 모델은 실험 소자에 stress를 특정 시간동안 단계별로 인가하는 방법이다. 정상 동작 환경하에서 소자는 step-stress가 아닌 constant-stress상에서 동작하므로 step-stress 가속 수명 모델의 수명 분포와 constant-stress 가속 수명 모델의 수명 분포사이의 관계를 설정해야 한다. 이 두 모델을 연관시키기 위해서는 step-stress 상의 소자 수명은 현재 인가된 stress와 누적분포를 따른다는 가정이 필요하다. 즉, 소자는 그전에 인가된 stress가 아닌, 현재의 stress에 의해 고장이 발생한다. 그럼 1은 step-stress 가속 수명 모델을 표현한 것이며, 고장 자료와 stress 전환 시간을 간략하게 보여주고 있다.

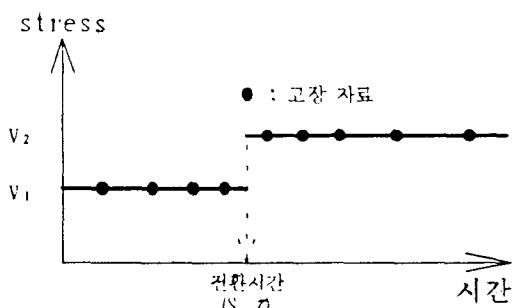


그림 1. Step-stress 가속 수명 모델
Fig. 1. The step-stress model.

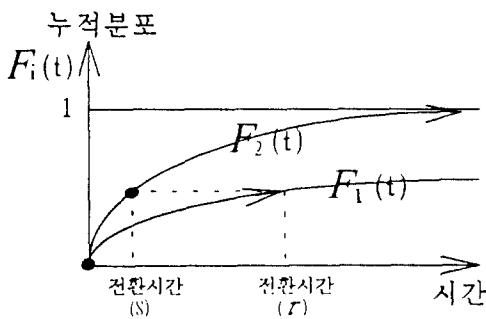


그림 2. constant- stress의 누적분포함수
Fig. 2. The cumulative distributed function of constant-stress model.

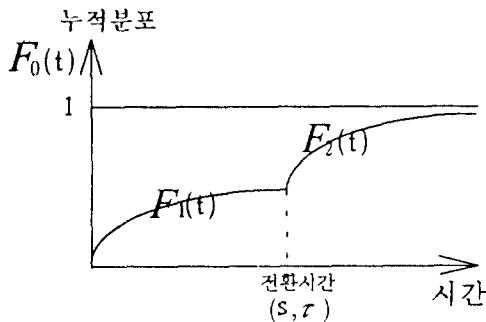


그림 3. Step-stress 가속 수명 모델의 누적분포 함수
Fig. 3. The cumulative distributed function of the constant-stress model.

그림 2는 각각의 constant-stress에 따른 소자의 누적분포함수를 보여준다. 화살표는 stress가 인가되는 시간 구간을 나타낸다. 그림 3은 step-stress가 인가되었을 때의 소자 수명의 누적분포함수를 표현한 것이다. 이 누적분포함수는 각 시간 구간에 따른 constant-stress의 누적분포함수로 이루어져 있다. step-stress 가속 수명 모델이 적용될 때 step i에서는 시간 t_{i-1} 부터 t_i 까지 stress V_{i-1} 이 인가된다. step-stress상의 누적분포함수를 $F_o(t)$ 라 하고 constant-stress 적용 시 각 stress V_i 가 인가될 때의 누적분포함수를 $F_i(t)$ 라 하면, step 1에서 constant-stress와 step-stress의 누적분포함수의 관계는

$$F_o(t) = F_1(t) \quad (5)$$

가 된다. step 2에서 stress가 인가되는 시작점 S 와 step 1의 끝점 τ 의 누적분포함수의 값이 동일하므로

$$F_2(S) = F_1(\tau) \quad (6)$$

와의 관계가 성립하며, step-stress와 constant-stress의 누적분포함수와의 관계는

$$F_o(t) = F_2(t - \tau + S) \quad (7)$$

가 된다. 이를 확률밀도함수로 표현하면

$$f_1(t) = (\beta / \theta_1^\beta) t^{(\beta-1)} \exp\{-(t/\theta_1)^\beta\} \quad 0 \leq t < \tau \quad (8)$$

$$f_2(t) = (\beta / \theta_2^\beta) (t - \tau + S)^{(\beta-1)} \exp\{-(t - \tau + S)/\theta_2\} \quad \tau \leq t < \infty \quad (9)$$

가 된다.

3 type-I censoring 가속 수명 모델

가속 수명 시험에서 획득한 고장 수명 자료가 분포의 끝 부분에서 알려지지 않으면, censored 되었다고 한다. type-I censoring 모델은 constant-stress 모델의 한 가지 형태로서 가속 수명 시험을 실시하기 전에 실험 종료 시간을 미리 결정하는 방법이다. N개의 실험소자의 고장 자료를 t_1, t_2, \dots, t_N 이라고 하면, 종료 시간은 t_L 는 $t_L \leq t_i < t_N$ 를 만족하여야 한다. 실험이 시간에서 종료될 때 n개의 고장 자료가 수집되면 N-n개의 자료를 censoring하는 방법이 type-I censoring이다. 이를 Weibull 분포에 적용하여 우도함수를 구하면 다음과 같다.

$$L(t) = [N! / (N-n)!] \prod_{i=1}^n \left[(\beta / \theta_i^\beta) t_i^{(\beta-1)} \exp\{-(t_i/\theta_i)^\beta\} \right] \cdot [1 - F(x_L)]^{N-n} \quad (10)$$

4. 최우추정법

stress와 고장 시간로 표현되는 확률밀도함수 내부의 모수를 추정하는 가장 신뢰할만한 방법 중의 하나로서 최우추정법이 사용된다. N개의 가속 수명 자료를 x_1, x_2, \dots, x_N 이라 하고, 추정할 모수를 θ 라고 할 때, 각 확률밀도함수 $f(x_i; \theta)$ 의 고장 자료들은 서로 독립적으로 발생하므로 결합밀도함수는 각 확률밀도함수의 곱으로 표현된다. 즉, 결합밀도함수는

$$L(x_1, x_2, \dots, x_N; \theta) = f(x_1; \theta) * f(x_2; \theta) * \dots * f(x_N; \theta) \quad (11)$$

이 된다. 이때, 결합밀도함수 $L(x_1, x_2, \dots, x_N; \theta)$ 를 우도함수(maximum likelihood function)라 한다. 고장 자료값을 상수로 갖는 우도함수는 모수 θ 에 의해 확률 값이 달라지게 되므로 우도함수를 최대로 하는 모수 θ 는 주어진 자료를 가장 잘 표현한다고 말할 수 있다. 우도함수를 최대로 표현하기 위해 우도함수를 모수로

편미분하여 우도함수의 최대값을 구한다. 그러나, 일반적으로 우도함수는 미분하기 용이하지 않으므로 우도함수에 \log 함수를 취한 \log 우도함수를 사용하여 계산한다.

III. Step-stress type-I censoring 가속 수명 모델과 모수 추정 방법

1. 제안한 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델

본 논문은 소자의 수명 분포가 Weibull 분포를 따른다고 가정하며 이 분포에 Inverse-power-law 모델을 적용하면, 수명 분포는

$$\begin{aligned} f(t) &= \beta(\varepsilon V^\omega) t^{(\beta-1)} \exp\{-(t\varepsilon V^\omega)^\beta\} \\ F(t) &= 1 - \exp\{-(t\varepsilon V^\omega)^\beta\} \end{aligned} \quad (12)$$

가 된다. 이때, 형태 모수 β , 물질 모수 ε , 전력 모수 ω 는 모두 양의 값을 갖는다.

step-stress type-I censoring 가속 수명 모델에서 stress의 갯수는 다양하게 존재할 수 있으나 본 논문에서는 stress를 V_1 과 V_2 두 가지만 선택한다. stress V_1 에서 소자의 갯수를 n_1 , stress V_2 에서 소자의 갯수를 n_2 , censoring 소자의 갯수를 n_c , stress 전환 시간을 s 와 τ 라 하고 censoring 시간을 t_{c2} 라 하면 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델은 그림 4와 같이 표현된다. 그림 4의 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델에 대한 constant-stress 가속 수명 모델은 그림 5와 같다.

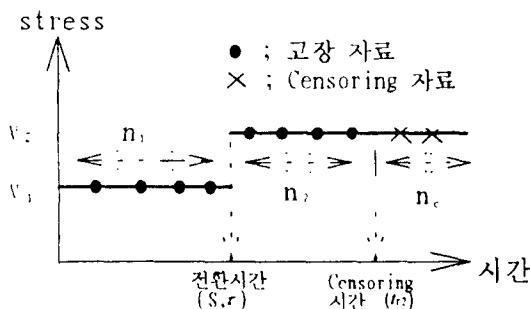


그림 4. Step-stress type-I censoring 모델
Fig. 4. The step-stress type-I censoring model.

각 구간에서 누적분포함수는

$$F_1(t) = 1 - \exp\{-(t\varepsilon V_1^\omega)^\beta\} \quad (13)$$

$$F_2(t) = 1 - \exp\{-(t-\tau+s)^\beta (\varepsilon V_2^\omega)^\beta\} \quad (14)$$

가 된다.

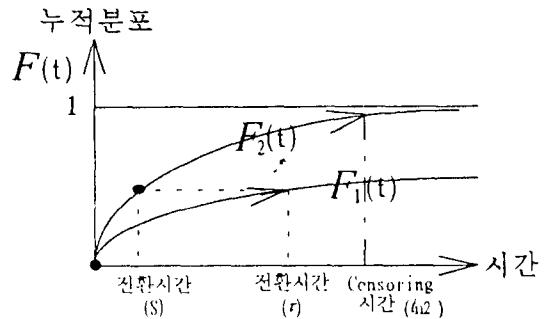


그림 5. Constant-stress 대한 누적분포함수
Fig. 5. The cumulative distributed function of constant-stress model.

Inverse-power-law 모델을 적용한 Weibull 누적분포함수 $F(t)$ 는 시간 τ 와 s 에서 동일하므로

$$1 - \exp\{-(\tau\varepsilon V_1^\omega)^\beta\} = 1 - \exp\{-(s\varepsilon V_2^\omega)^\beta\} \quad (15)$$

가 된다. 그 결과식 (14)는

$$F_2(t) = 1 - \exp\{-(t-\tau + (V_1/V_2)^\omega \tau)^\beta (\varepsilon V_2^\omega)^\beta\} \quad (16)$$

가 된다. stress V_1 에서 우도함수는

$$L_1 = \prod_{i=1}^{n_1} \beta(\varepsilon V_1^\omega)^\beta t_i^{(\beta-1)} \exp\{-(t_i \varepsilon V_1^\omega)^\beta\} \quad (17)$$

가 되고, stress V_2 가 인가되었을 때, t_{c2} 에서 Type-I censoring 하였으므로 stress V_2 에서 우도함수는

$$\begin{aligned} L_2 &= [(n_2 + n_c)! / n_c!] \prod_{i=1}^{n_2} [\beta(\varepsilon V_2^\omega)^\beta (t_i - \tau + (V_1/V_2)^\omega \tau)^{(\beta-1)} \\ &\quad * \exp\{-(t_i - \tau + (V_1/V_2)^\omega \tau)^\beta (\varepsilon V_2^\omega)^\beta\} \\ &\quad * \exp\{-(t_{c2} - \tau + (V_1/V_2)^\omega \tau)^\beta (\varepsilon V_2^\omega)^\beta\}] \end{aligned} \quad (18)$$

가 된다. 따라서 stress V_1 과 V_2 에 따른 우도함수는

$$\begin{aligned} L &= \prod_{i=1}^{n_1} [\beta(\varepsilon V_1^\omega)^\beta t_i^{(\beta-1)} \exp\{-(t_i \varepsilon V_1^\omega)^\beta\}] \\ &\quad \prod_{i=1}^{n_2} [\beta(\varepsilon V_2^\omega)^\beta (t_i - \tau + (V_1/V_2)^\omega \tau)^{(\beta-1)} \\ &\quad \exp\{-(t_i - \tau + (V_1/V_2)^\omega \tau)^\beta (\varepsilon V_2^\omega)^\beta\})] \\ &\quad [(n_2 + n_c)! / n_c!] \prod_{i=1}^{n_c} [\exp\{-(t_{c2} - \tau \\ &\quad + (V_1/V_2)^\omega \tau)^\beta (\varepsilon V_2^\omega)^\beta\}] \end{aligned} \quad (19)$$

가 된다. 우도 함수를 최대로 표현하기 위한 모수 β, ϵ, ω 를 구하기 위하여 우도함수를 각각의 모수로 편 미분한다. 계산의 편의를 위해 우도함수에 \log 를 취한다.

$$\begin{aligned} \partial \ln L / \partial \beta &= (n_1 + n_2) / \beta + (n_1 + n_2) \ln \epsilon + (n_1 \ln V_1 + n_2 \ln V_2) \omega \\ &\quad + \sum_{i=1}^{n_1} \ln t_i + \sum_{i=1}^{n_2} \ln (t_i - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta} \\ &\quad - \epsilon^{\beta} (V_1^{\omega})^{\beta} \sum_{i=1}^{n_1} t_i^{\beta} (\ln t_i + \ln \epsilon + \omega \ln V_1) \\ &\quad - \epsilon^{\beta} (V_2^{\omega})^{\beta} \sum_{i=1}^{n_2} (t_i - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta} \\ &\quad (\ln (t_i - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta} + \ln \epsilon + \omega \ln V_2) \\ &\quad - n_1 \epsilon^{\beta} (V_2^{\omega})^{\beta} (t_{n_2} - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta} \\ &\quad (\ln (t_{n_2} - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta} + \ln \epsilon + \omega \ln V_2) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \partial \ln L / \partial \omega &= n_1 \ln V_1 + n_2 \ln V_2 \\ &\quad + ((\beta-1) / \beta) (V_1 / V_2)^{\omega} \tau \ln (V_1 / V_2) \\ &\quad \sum_{i=1}^{n_2} (t_i - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{-1} \\ &\quad - \epsilon^{\beta} V_1 \ln V_1 \sum_{i=1}^{n_1} t_i^{\beta} \\ &\quad - \epsilon^{\beta} V_2 (V_1 / V_2)^{\omega} \tau \ln (V_1 / V_2) \\ &\quad \sum_{i=1}^{n_2} (t_i \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta-1} \\ &\quad - \epsilon^{\beta} V_2 \ln V_2 \sum_{i=1}^{n_2} (t_i - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta} \\ &\quad - n_1 \epsilon^{\beta} V_2 (V_1 / V_2)^{\omega} \tau \\ &\quad 1n(V_1 / V_2)(t_{n_2} - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta-1} \\ &\quad - n_1 \epsilon^{\beta} V_2 1n V_2 (t_{n_2} - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \partial 1nL / \partial \epsilon &= n_1 + n_2 \\ &\quad - \epsilon^{\beta} V_1 \sum_{i=1}^{n_1} t_i^{\beta} - \epsilon^{\beta} V_2 \sum_{i=1}^{n_2} (t_i - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta} \\ &\quad - n_1 \epsilon^{\beta} V_2 (t_{n_2} - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta} \end{aligned} \quad (22)$$

가 된다. $\partial 1nL / \partial \epsilon$ 를 모수 $\epsilon^{\beta}, 1n\epsilon$ 에 대해 정리하면,

$$\epsilon^{\beta} = \frac{(n_1 + n_2)}{V_1 \sum_{i=1}^{n_1} t_i^{\beta} + V_2 \sum_{i=1}^{n_2} (t_i - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta} + n_1 V_2 (t_{n_2} - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta}} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} 1n\epsilon &= \frac{1}{\beta} [1n(n_1 + n_2) \\ &\quad - 1n(V_1 \sum_{i=1}^{n_1} t_i^{\beta} + V_2 \sum_{i=1}^{n_2} (t_i - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta}) \\ &\quad - n_1 V_2 (t_{n_2} - \tau + (V_1 / V_2)^{\omega} \tau)^{\beta}] \end{aligned} \quad (24)$$

가 된다. 식 (23)과 식 (24)를 식 (20)과 식 (21)에

대입하여 $\partial 1nL / \partial \beta = 0$ 와 $\partial 1nL / \partial \omega = 0$ 를 만족하는 모수를 구하여한다.

2. Step-stress type-I censoring 모델의 모수 추정 및 고장 수명의 예측

Weibull 분포를 적용한 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델의 모수 추정을 위해 최우 추정법을 적용하면 비선형 연립방정식이 발생한다.

$\partial 1nL / \partial \beta = 0$ 과 $\partial 1nL / \partial \omega = 0$ 를 만족하는 비선형 연립방정식의 해를 얻기위해 Modified-quasi-linearization 방법^[11]을 적용한다.

단계 1: 모수의 집합 $S = (\beta, \omega)$ 과 초기값 $\beta^0 = 0.1, \omega^0 = 0.1$, 계산 오차를 $\psi = 10^{-21}$ 결정하고, 경계 조건 을 설정한다. 초기값은 경계 조건을 만족해야한다.

단계 2: 비선형 연립방정식을 행렬로 구성하여 성능 지표를 구한다.

$$\begin{aligned} K[\beta^t \omega^t] &= [\partial 1nL / \partial \beta \quad \partial 1nL / \partial \omega] \\ P[\beta^t \omega^t] &= K[\beta^t \omega^t] * K^T[\beta^t \omega^t] \end{aligned}$$

여기서 위첨자 t는 반복 계산 횟수를, T는 전치행렬을 표기한다.

단계 3: Jacobbian 행렬을 구성하여 모수증가분을 계산한다.

$$\beta[\beta^t \omega^t] = \begin{bmatrix} \partial / \partial \beta (\partial 1nL / \partial \beta) & \partial / \partial \omega (\partial 1nL / \partial \beta) \\ \partial / \partial \beta (\partial 1nL / \partial \omega) & \partial / \partial \omega (\partial 1nL / \partial \omega) \end{bmatrix}$$

$$\delta S[\beta^t \omega^t] = B[\beta^t \omega^t]^{-1} K[\beta^t \omega^t]$$

단계 4: 수렴 상수를 이용하여 새로운 모수 값을 계산 한다. 수렴 상수(a)는 1이다.

$$a = 1,$$

$$S[\beta^{t+1}, \omega^{t+1}] = S[\beta^t, \omega^t] + \alpha \delta S[\beta^t, \omega^t]$$

단계 5: 만일 $S[\beta^{t+1}, \omega^{t+1}]$ 의 원소 $\beta^{t+1}, \omega^{t+1}$ 가 경계 조건 $\beta^{t+1} > \omega^{t+1} > 0$ 을 만족하지 못하면, $\beta^{t+1} = \beta^t, \omega^{t+1} = \omega^t$ 로 하여 단계 3을 실행한다.

단계 6: 새로운 모수 $\beta^{t+1}, \omega^{t+1}$ 로 성능 지표를 계산하여 β^t, ω^t 의 성능 지표와 비교한다.

$$P[\beta^{t+1} \omega^{t+1}] < P[\beta^t \omega^t]$$

를 만족하면 단계 7를, 그렇지않으면, 단계 2를 실행한다.

단계 7: $P[\beta'^{t+1} \omega'^{t+1}] < P[\beta^t \omega^t]$ 이면, 단계 8를 실행한다.

그렇지 않으면, $\alpha = \alpha/2$ 로 하여 단계 4를 실행한다.
 $\alpha \leq 10^{-6}$ 이면, 단계 8를 실행한다.

단계 8: program을 종료한다. 이때의 $\beta'^{t+1}, \omega'^{t+1}$ 가 비선형 연립방정식의 해가 된다.

Modified-quasi-linearization 방법으로 구한 β, ω, ϵ 의 추정값을 누적분포함수에 적용시켜 고장 시간과 stress의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$F(t, V) = 1 - \exp [-(t\epsilon V^\omega)^\beta] \quad (25)$$

$$t_F(V) = \exp [(1/\beta)U - 1n\epsilon - \omega 1nV] \quad (26)$$

단. $U = 1n[-1n[1-F]]$, U 는 Weibull분포의 최소극값분포를 나타낸다.

소자의 고장 수명은 식(26)에 의해 임의의 고장률과 동작 stress를 설정하면 예측할 수 있다.

IV. 실험 및 결과

CMOS 14050B Hex Buffer는 16핀(pin)으로 구성되어 있다. 그림 6은 CMOS 14050B Hex Buffer의 내부 구조와 실험 장비를 간략하게 보여준다. 본 논문에서는 한 소자당 한 개의 자료를 획득하기 위해 5번 펀만을 입력 펀으로 선택하여 51V와 52V를 인가하였다. 바이어스 전압은 10V를 공급하였으며, 최초 51V를 인가하고 2400분이 경과한 후에 52V로 전압을 전환하는 step-stress 가속 수명 시험을 실시하였다.

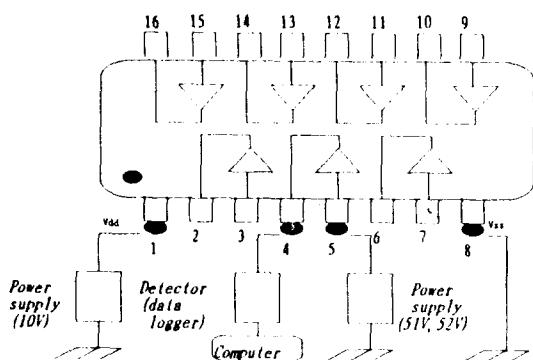


그림 6. CMOS 14050B Hex Buffer의 내부구조와 실험장비

Fig. 6. The internal structure of CMOS 14050B Hex Buffer and the experimental equipments.

본 논문은 바이어스 전압 10V, 입력 전압 10V와

13V가 인가될 때 고장률에 따른 CMOS 14050B Hex Buffer의 수명 예측을 목적으로 한다. 표 1에 가속 수명 자료를 표기하였다.

표 1. CMOS 14050B Hex Buffer에 대한 step-stress 가속 수명 자료

Table 1. The step-stress accelerated life data of Hex Buffer.

	시작 시간 (51 volt)	전환 시간 (52 volt)	고장 시간	전체 고장 시간 (분)
1	7/7 17시 51분		7/7 20시 07분	136
2	7/18 21시 54분		7/19 22시 01분	1353
3	7/7 17시 47분		7/8 23시 07분	1760
4	7/9 12시 41분		7/10 19시 23분	1842
5	7/7 17시 48분		7/9 02시 45분	1977
6	7/11 18시 53분		7/13 03시 52분	1979
7	7/18 21시 29분		7/20 07시 42분	2053
8	7/9 13시 22분		7/11 00시 15분	2093
9	7/9 12시 38분		7/11 02시 22분	2264
10	7/11 18시 57분	7/13 10시 57분	7/13 13시 47분	2570
11	7/18 21시 44분	7/20 13시 44분	7/20 18시 10분	2666
12	7/11 18시 54분	7/13 10시 54분	7/13 16시 02분	2708
13	7/9 12시 35분	7/1 04시 35분	7/11 18시 24분	3229
14	7/18 21시 35분	7/20 13시 49분	7/21 07시 38분	3469
15	7/18 21시 41분	7/20 13시 41분	7/21 13시 11분	3810
16	7/11 18시 50분	7/13 10시 50분	7/14 10시 34분	3824
17	7/18 21시 32분	7/20 13시 32분	7/21 18시 08분	4116
18	7/11 18시 55분	7/13 10시 55분	7/14 16시 13분	4158
19	7/18 21시 36분	7/20 13분 36분	7/22 07시 22분	4906

V. 비교 및 고찰

본 절에서는 CMOS 14050B에 대해 가속 수명 시험을 실시하여 획득한 고장 자료를 step-stress 가속 수명 모델과 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델에 적용하여 각각의 모델에 존재하는 모수들의 추정 값과 소자의 고장 수명을 비교하였다. step-stress type-I censoring 가속 수명 모델이 적용될 때 CMOS 14050B 가속 수명 시험 자료의 censoring 시간은 censored 자료와 마지막 자료의 중간 값인 4300분으로 설정하였다. 표 2는 각 모델을 사용하여 계산한 모수의 추정값을 보여 준다. 표 3은 식(26)을 사용하여 V_{dd} 10V와 입력 전압 10V가 인가되었을 때 고장률에 따라 예측된 CMOS 14050B의 수명을 보여 주며, 표 4는 V_{dd} 10V 입력 전압 13V에서 고장률에 따른 소자의 수명을 나타낸다. 표 2를 고찰해 보면 Weibull분포를 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델에 적용시켜 구한 모수의 추정값과 기존의 step-stress 가속 수명 모델의 모수 추정값의 오차가 무시할 수 있을 만큼 근소함을 알 수 있다. 표 3과 표 4를 통해 두 모델간의 고장 시간에 대한 오차 또한 근소함을 알 수 있다. 또한 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델을 적용한 CMOS

14050B Hex Buffer의 가속 수명 시험 결과를 살펴 보면 기존의 모델에 비해 약 600분의 실험시간이 단축 됨을 알 수 있다. 그러므로 본 논문에서 제안한 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델은 가속 수명 시험시간을 대폭 단축시켜 소요 장비와 비용을 절감하면서도 소자의 수명에 대해 비교적 정확한 값을 산출함을 알수 있다.

표 2. Step-stress 가속 수명 모델과 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델의 모수 추정값에 대한 비교

Table 2. Comparision of the step-stress model and the step-stress type-I censoring model to the parameter estimator.

형태 모수	전력 모수	봉질 모수
step stress	2.3032573734219	3.76707436453317
step-stress type-I censoring	2.2733268172111	3.76036122284346

표 3. 바이어스 10V, 입력전압 10V에서 고장률에 따른 CMOS 14050B Hex Buffer의 고장 수명

Table 3. The life time of Hex Buffer to the failure rate on the input 10V.

고장 %	고장수명(일)		고장 수명(일)	
	step-stress	type I censoring	step-stress	type I censoring
1%	132.448	127.743	55	885.130
5%	268.772	261.651	60	939.616
10%	367.377	359.118	65	996.786
15%	443.439	434.545	70	1057.877
20%	508.874	499.572	75	1124.665
25%	568.214	558.637	80	119.956
30%	632.800	614.041	85	1288.766
35%	677.082	667.209	90	1401.834
40%	729.081	719.150	95	1571.507
45%	780.609	770.669	99	1894.061
50%	832.388	822.483		1891.893

VI. 결 론

기존의 step-stress 가속 수명 모델은 constant-stress 가속 수명 모델의 가속 수명 시험 기간을 단축 하기위해 사용하였으나 이 step-stress 또한 고장 자료가 시간 영역에 폭넓게 위치하는 경우 많은 실험 기간이 소요된다. 이와 같은 문제점을 개선하기위해 본 논문에서는 stress를 전압으로 하는 step-stress 가

속 수명 시험을 실시하여 획득한 고장 자료의 일부를 type-I censoring하고 수명 분포로는 Weibull분포를 적용한 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델을 제안하였다. Weibull분포를 적용한 step-stress type-I censoring 가속 수명 모델은 step-stress 가속 수명 모델에 type-I censoring 가속 수명 모델이 추가됨에 따라 수식적인 절차가 복잡해지는 점은 있으나, 가속 수명 시험 기간을 단축함으로써 장비와 비용을 절감하는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 두가지 전압만을 선택하여 실험 자료를 수집하였으나, 인가하는 전압의 갯수를 증가시키고 censoring을 수행하면 보다 많은 실험 시간을 단축시킬수 있으며, 소자의 고장은 단일 stress가 아닌 온도, 전압, 습도, 진동, 방사선등 여러인자가 소자에 작용하여 발생하므로 다양한 고장 모델에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

표 4. 바이어스 10V, 입력전압 10V에서 고장률에 따른 CMOS 14050B Hex Buffer의 고장 수명

Table 4. The life time of Hex Buffer to the failure rate on the input 13V.

고장 %	고장수명(일)		고장 수명(일)		
	step-stress	type I censoring	고장 %	step-stress	type I censoring
			step-stress		
1%	49.296		47.629	55	329.438
5%	100.035		97.556	60	349.717
10%	136.735		133.896	65	370.996
15%	165.045		162.019	70	393.733
20%	189.399		186.264	75	418.591
25%	211.484		186.264	80	446.614
30%	232.173		208.287	85	476.668
35%	252.004		228.944	90	521.751
40%	271.358		268.134	95	584.902
45%	290.536		287.342	99	704.954
50%	309.080		306.661		705.389

참 고 문 헌

- [1] Wayne Nelson,"Graphical Analysis of Accelerated Life Test Data with the Inverse Power Law Model," IEEE Trans. Reliability, Vol.R-21, No.1, PP.2-11, Feb. 1972.
- [2] Wayne Nelson,"Faster Accelerated Life Testing by Step-Stress: Models and Data Analyses," GE Co. Corp. R&D TIS

Report 78CRD051, 1978.

- [3] Wayne Nelson, C.B Morgan."Optimum Simple Step-Stress Tests for Accelerated Life Testing," GE Co. Corp. R&D TIS Report 79CRD262, 1979.
- [4] D.S. Bai, M.S. Kim, S.H. Lee."Optimum Simple Step-Stress Accelerated Life Tests with Censoring." IEEE Trans. Reliability, Vol.38, No.5, PP.528-532, Dec. 1989.

- [5] Eugene H. Lehman JR."Shapes, Moments and Estimators of the Weibull Distribution," IEEE Trans. Reliability, Vol.1, PP.32-38, Sep. 1963.
- [6] Dalls R. Wingo."Solution of the Three-Parameter Weibull Equations by Constrained Modified Quasilinearization Progresively Censored Samples)," IEEE Trans. Reliability, Vol.R-22, No.2, PP. 96-102, Jun. 1973.

저자 소개

吳英煥(正會員) 1947년~12월 29일 출생. 1995년
~현재 광운대학교 전자통신공학과
교수



丁在聲(正會員)

1968년 출생. 1995년 2월 광운대학교 전자통신공학과 석사과정 졸업. 현재 대우엔지니어링 근무