

# 시장데이터와 실험데이터를 이용한 제품 수명 예측

김진영

삼성전자 CS센터 신뢰성시험소

전치혁

포항공과대학교 산업공학과

## ABSTRACT

An ALT(accelerated life testing) method is to test a product in over-stressed conditions, and then the test result is extrapolated to an usual(normal stressed) condition. It is the major disadvantage of ALT method that the more extrapolation to an usual condition applies the bigger error is indispensable. Therefore a reliability model combining field failure data and laboratory test data is required in practice. We propose several methods of estimating the failure rate of a product life which is assumed to follow an exponential distribution. Structural similarity and technological advances are also considered. Finally, We derive the acceleration factor which can be used to predict the failure rate for a new product.

### 1. 서론

90년대의 가장 두드러진 특징 중 하나는 '고객 만족의 시대'이다. 이러한 시대적 분위기는 현대 소비자들의 제품 신뢰성에 대한 인식 증가와 함께 수입 관세의 인하 등을 유도하여 제품 선택의 폭을 보다 넓히게 되었다. 이러한 상황은 다시 새로운 고객의 요구로 이어져 제품 수명 주기를 더욱 짧게 하는 결과를 초래함과 동시에 국내 산업계에 있어서도 제품 신뢰도에 대한 관심과 연구를 증가시키는 요인이 되었다. 새로운 제품의 개발이나 제품의 신뢰도 향상을 위해서는 제품의 수명 시험 데이터와 실제 사용으로 인한 수리 정보의 올바른 분석이 중요하지만 현재 국내 산업계에서는 수명 데이터의 수집은 많이 하지만 이에 대한 체계적인 분석은 거의 못하고 있는 실정이며, 그 동안의 국내외의 많은 연구가 실험실 정보를 위주로 연구가 되어 왔고 수리 정보에 대한 연구는 아주 극소수에 불과하다.

수명 데이터의 분석은 수명 분포 또는 그 분포의 모수들을 추정하고, 신뢰도, 고장률, 고장시간의 백분위수, 평균 고장 시간 등 원하는 여러 정보를 얻는데 사용된다. 제품의 수명데이터의 분석

으로부터 얻어지는 이와 같은 정보는 새로운 제품의 개발, 제품의 신뢰도 개선, 최적 번인(burn-in)기간의 결정, 제품 보증 정책의 설정, 예방 부품 교환 정책, 수리 정책, 예비 부품 재고 정책 등의 결정에 활용될 수 있다.

일반적으로 수명데이터는 제품의 수명 시험을 통하여 얻어질 수 있으며, 또한 수리 센터에서 입력된 정보를 이용할 수도 있다. 대개의 경우 수명 시험을 하여 얻어지는 데이터는 수명 시험에 따르는 비용과 시간을 줄이기 위해 모든 시제품의 고장 유무에 상관없이 특정한 시점까지만 시험을 행하는 관측 중단된 형태로 얻어지게 된다. 만약 분석하고자 하는 데이터를 실험실 데이터에만 의존한다면 실제 수명에 대해 왜곡된 정보를 얻을 위험이 있고, 실제 사용데이터에만 의존한다면 정보를 얻는데 시간이 오래 걸릴 뿐 아니라 신제품 등의 신뢰도 예측에는 사용할 수 없다.

이러한 상황을 미루어 볼 때 체계적이고 효과적으로 수명데이터를 분석할 수 있는 도구가 필요하며, 특히 설계실과 현장의 엔지니어들에게는 그 필요성이 더욱 크다.

본 연구에서는 실험실 정보와 실제 수리 정보를 함께 고려한 신뢰도 모형을 이용함으로써 시험 시간과 시험 비용의 감소와 함께 보다 쉬운 방법으로 신제품의 신뢰도 예측을 행할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 뿐만 아니라 본 연구에서는 기존의 대부분의 연구에서 다루지 않았던 기술 발전에 따른 신뢰도의 향상을 감안함으로써 보다 현실적인 모형을 제시하고자 한다.

### 2. 신뢰성 연구의 분류와 기존연구

신뢰성 연구는 크게 시험의 유무, 가속(acceleration)의 유무, 수명 데이터의 형태, 스트레스의 인가 방법(stress loading), 가정한 수명 분포, 모수추정방법에 따른 조합으로 나눌 수 있다. 기존의 많은 연구들이 실제 field에서의 자료가 아닌 실험실에서 종결된(censored)가속수명 시험(ALT; accelerated life test) 자료를 MLE 방법을 이용하여 모수를 추정하고 있다. [1][2][3][4][5][6][7] 다시말하면 field 자료와 실험실 자료를 함께 고려한 모형은 아직 제시되지 않고 있다.

### 3. Field 정보와 실험실 정보의 결합에 의한 신뢰성 분석

본 연구에서는 일부가속 수명시험(partially accelerated life tests ; PALT)[4]와 같은 개념을 도입하여, PALT에서 임의의 주어진 시간까지 정상 조건하에서 수명 시험을 행하는 것을 A/S 데이터에 의한 정보로 대치하는 새로운 개념의 신뢰도 이론을 제시하고자 한다.

이를 위한 기본 가정을 정리하면 다음과 같다.

(1) 제품 수명은 주어진 기간 동안의 제품의 고장 회수로만 나타낼 수 있으며, 각각의 고장은 서로 독립이다.

(2) 고장난 제품을 수리하는 시간은 무시할 수 있을 정도로 짧다.

(3) 정상 조건에서의 수명은 평균이  $1/\lambda_{normal}$  인 지수분포를 따른다.

(4) 가속 상태에서의 수명은 평균이  $1/\lambda_{acc}$  인 지수분포를 따른다.

(5) 고장이 나면 즉시 A/S 요청을 한다.

본 연구에서는 위의 기본 가정하에 A/S 데이터를 제품 특성에 따라 여러 가지 통계적 기법을 이용하여 가속 조건에서의 데이터와 접목을 시도하며 특성이 유사한 제품의 고장률 추이를 분석하여 기술의 발전 속도에 의해 수명이 연장된 만큼을 보정해 준다. 이러한 방법을 이용함으로써 보다 정확하게 제품의 수명을 예측할 수 있다. 즉, 새로운 제품 p에 대한 수명을 알고자 할 경우, 제품 p와 유사한 제품 p'의 A/S 데이터를 분석한다. 이때 제품 p'의 제품군이나 제품 모델명 등에 의한 구조적인 정보를 고려하며, 또한 A/S 데이터의 분석에 의해 기술 발전 정도를 추정하여 기술 발전 정도에 따라 보정을 행한다. 이 데이터와 함께 제품 p에 대해 가속수명을 행한 데이터를 이용하여 실험조건의 제품 p에 대한 가속계수와 함께 제품 p의 수명을 예측할 수 있다. 이렇게 구해진 예측 수명은 필요에 따라 보증 정책, A/S 비용의 산출, 구매자나 소비자 등에 제공될 수도 있고, 외주 검사 등에도 적용될 수도 있으며 추후 검사에의 중요한 자료로도 사용되며, 제품 p가 양산 단계에 있으며 제품 p에 대한 실제적인 A/S 데이터를 이용하여 실험 방법과 분석 방법에 대한 유효성 검증을 행할 수 있다.

## 4. 가속시험 데이터와 A/S데이터 분석

### 4.1 가속시험 데이터 분석

가속시험을 행한 데이터는 중앙순위를 이용하여  $F(t)$ 를 구한 다음 지수분포 확률치를 이용하여 간단히 분석할 수 있다.

### 4.2 A/S 데이터 분석

본 절에서는 경과일을 고려한 고장비율을 이용한 경우와 최우추정법을 이용한 경우 및 비모수적

방법을 이용한 경우의 A/S 데이터 분석방법에 대해 알아보하고자 한다.

### 4.2.1 경과일을 고려한 고장비율을 이용한 A/S 데이터분석

가속수명시험의 경우는 데이터가 적어 rank 개념을 도입하였으나, 기업에서 판매한 제품에 대한 A/S 데이터와 같이 시료수가 많은 경우에는 수명 시간의 누적분포 함수를 구할 때 고장비율을 바로 이용하면 된다. 그러나 이 경우에는 제품이 소비자에게 인도된 시간이 모두 다르므로 달력시간(calendar time)상의 고장시간이 문제가 되는 것이 아니라 고장 시간까지의 총 사용시간이 문제가 된다. 이와 아울러 A/S 데이터와 같은 현장데이터를 분석할 때는 기록상의 오류, 고객들의 일반적인 불만 사항, 고객이 사용하는 환경하에서의 성능, 국제적인 성능과 국지적인 성능 등을 고려해야 하는데 본 연구에서는 이러한 것들은 고려하지 않는다.

$r_{ij}$  ( $i \leq j$ ): i월에 판매된 제품 p가 j월에 고장난 (서비스 요청한) 수

$n(i)$  : i월의 제품 p의 판매량

$d$  : 제품 p의 1일 평균 사용시간

$k$  : A/S 데이터 관리기간(개월)

$T_0$  : 현재월

A/S 데이터는 월별로 집계가 되어 일별 고장을 알 수 없기 때문에 고장은 매월 보름에 발생한다는 가정과 1달은 30일이라는 가정이 추가로 필요하다. 이때 u개월 사용한 제품의 평균사용시간  $t_{u,u}$  개월 사용한 제품의 고장수  $R_u$ , u 개월 사용한 제품에 대응하는 판매량  $N_u$ 는 다음과 같다.

$$t_u = [30(u-1) + 15]d$$

$$R_u = \sum_{T_0-k \leq j \leq T_0} r_{j-u,j}$$

$$N_u = \sum_{T_0-k \leq j \leq T_0} n(j-u), \quad u = 0, 1, 2, \dots$$

그리고 판매 후 s개월 동안의 고장을 초기 고장이라고 했을 때 초기 고장을 제외한 i월에 판매한 제품에 대한 제품의 고장수  $r_o(i)$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$r_o(i) = \sum_{j \geq i+s} r_{i,j}$$

또한 i월에 판매한 제품에 대한 초기 고장을 제외한 상태의 단위 월에 발생한 고장수  $r_m(i)$ 는  $r_o(i)$ 를 그에 대응하는 개월수로 나누어 구할 수 있으며, i월에 판매된 제품에 대한 해당 월별 고장수  $\lambda_m(i)$ 는 단위 월의 고장수  $r_m(i)$ 를 대응하는 월의 판매량  $n(i)$ 으로 나누어 구할 수 있다. 즉,  $\lambda_m(i) = r_m(i)/n(i)$ 이 되며, 해당 시간당 고장수  $\lambda_k(i)$ 는 단위 월의 사용시간으로 나누어 구할 수 있다. 즉,  $\lambda_k(i) = \lambda_m(i) / 30d$ 이다.

이와 같은 시료수가 많은 필드 A/S 자료의 고장 관련 모수들을 확률용지에 의해 추정하기 위해서는 rank값 대신 누적밀도 함수를 사용하면 된다.

#### 4.2.2 최우추정법을 이용한 A/S 데이터 분석

제품의 수명분포는 지수분포를 따르고,  $i$ 월에 생산된  $j$ 번째 제품의 주어진 시간  $T$ 까지의 고장횟수를  $r_i$ 라하고 각각의 고장시간을  $t_{i,j}$ 라 할때, 임의의 월에 생산된  $n$ 개의 제품에 대한 우도함수와 MLE는 다음과 같다.

$$L(\underline{t}; \lambda) = \prod_{i=1}^n \left\{ \prod_{j=1}^{r_i} f(t_{i,j} - t_{i,j-1}; \lambda) (T - t_{i,r_i}) \right\}$$

$$= \lambda^{\sum_{i=1}^n r_i} e^{-n\lambda T}$$

$$\hat{\lambda} = \sum_{i=1}^n r_i / nT$$

즉, 지수분포를 가정할 경우  $\lambda$ 의 추정치는 전체 시험시간(Total Time on Test) 동안에 발생한 전체 고장수의 합의 비율을 의미한다. 하지만 A/S 데이터를 분석할 때에는 전체시험시간 대신에 전체 운용시간(Total Time on Operation; TOTO)을 이용해야 하며, 같은 방법을 A/S 데이터가 주어진 전체 기간에 대하여서도 쉽게 확장할 수 있다. 그러므로  $\lambda$ 의 추정치는 A/S 기간 동안의 TOTO에 대한 전체고장수의 합의 비율로 쉽게 구할 수 있다.

#### 4.2.3 비모수적 방법을 이용한 A/S 데이터 분석

본 절에서는 시간 축이 구간으로 주어진 경우의 비모수적 방법으로, 먼저 시간 축을  $k$ 개의 구간  $[t_0, t_1), [t_1, t_2), \dots, [t_{k-1}, t_k)$ 으로 나누었다라고 가정하자. 그리고  $r_j$ 는 구간  $j$ 에서의 고장수를 나타내며,  $m_j$ 는 구간  $j$ 의 시작 시점에서 작동하고 있는 items의 수를 나타낸다면 한 item이 구간  $j$ 내에서 고장날 조건부 확률의 추정치는  $r_j/n_j$ (관측이 구간의 끝에 이루어 질 때) 혹은  $r_j/(n_j - m_j)$ (관측이 구간의 처음에 이루어 질 때)이 된다. 그러므로 구간 내에서 풀고루 고장이 일어난다면 조건부 확률은  $r_j/(n_j - m_j/2)$  이 된다. 그러므로  $t_i$  시점의 생존함수의 추정치와 분산은 다음과 같다.[8]

$$\hat{S}(t_j) = \prod_{i=1}^j \left( 1 - \frac{r_i}{n_i - m_i/2} \right)$$

$$\hat{V}[S(t_j)] = \left\{ \sum_{i=1}^j \frac{r_i}{(n_i - m_i/2)(n_i - m_i/2 - d_i)} \right\}$$

$$\times \hat{S}(t_j)^2 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, k$$

그러나 비모수적 방법에 의한 결과를 모수적 방법에 의한 4.2.1절이나 4.2.2절의 결과와 단순 비교할 수 없다. 그러므로 모수적 방법과 비교하

기 위해서는 비모수적 방법을 이용하여 구한 생존함수의 값을 지수분포에 적합화 시켜 모수를 구할 수 있다.

#### 4.2.4. 각 방법에 대한 비교 분석

이상에서 알 수 있는 것은 지수분포의 우도함수를 이용할 경우는 제품에 대한 생존함수의 상한을 제시해 준다고 볼 수 있다. 즉, 실제 상황보다 고장이 많이 일어나지 않는 것으로 예측을 하는 경향을 가진다. 또한 경과월을 고려한 고장비율을 이용하는 방법은 현장에서 쉽게 적용을 할 수 있으며, 지수분포와 비슷한 유형으로 예측을 하며, 비모수적 방법을 이용할 경우 A/S 데이터의 실제 상황을 보다 잘 반영하는 정확한 값을 얻을 수 있으나 계산이 복잡한 단점을 가지고 있다.

#### 4.3 기술발전 정도의 추정

본 절에서는 기술발전 정도의 척도인  $\lambda_{\text{technology}}$ 에 관해서 알아보고자 한다. 먼저  $\lambda_{\text{technology}}$ 는 기본적으로 다음과 같은 가정을 필요로 한다.

(1) 판매 월에 발생한 고장은 초기 불량으로 기술적인 제품 불량과는 무관하다.

(2) 냉난방기와 같은 계절변동을 갖는 계절성 상품은 분석에서 제외한다.

일반적으로 한 제품의 불량이 발생해서 그것이 수정 보완되는 기간은 평균 약 3 개월 정도가 소요된다. 그러므로 그 기간 동안은 동일한 제품 불량으로 인한 우발고장이 발생할 수 있다고 할 수 있으며, 그에 의한 기복이 상쇄되도록 하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 매월별 판매 월로부터  $\gamma$  개월간의 초기 고장을 제외한 전체 고장수를 경과월수로 나누어 월별 고장수  $m(i)$ 를 구하고, 이를 이용하여 해당 시간당 고장수를 구한후 이를  $t$  개월 이동평균법을 이용하여 척도인  $\lambda_{\text{technology}}$ 를 구한다.

#### 4.4 모수의 추정

이미 알고 있는 한 제품의 정상 조건에서의 수명이  $t_{\text{mean}}$ 이라 하고, 가속 조건에서의 수명이  $t_{\text{accelerate}}$ 이라고 할 때, 앞당겨진 시간의 비율을 우리는 흔히 가속계수라고 한다. 즉 가속계수를  $\beta$ 라고 하면  $t_{\text{mean}} = \beta t_{\text{accelerate}}$ 와 같이 나타낼 수 있다.

앞에서 언급된 가속수명시험 데이터의 분석법과 A/S 데이터의 분석, 그리고 기술발전 정도의 추정을 통하여 우리는 쉽게 가속계수를 구할 수 있다.

일반적으로 기술 발전이 안정적인 제품군은 제품 고장으로 인한 불량을 자체도 전체적으로 상당히 안정적이지만, 신규 사업과 같은 새로운 제품군과 같이 불안정적인 제품군은 제품 고장으로 인한 불량을 또한 제품군 내의 각 모델에 밀접한 관계가 있으며, 각 제품군끼리는 서로 구별되는 제품 불량을 가진다. 즉 한 모델의 제품불량을

추정하기 위해서는 제품군 전체의 불량률 즉, 각 모델들에 의해 평균화된 값보다도 각 모델의 제품 불량률에 보다 큰 비중을 두어야 한다. 그러므로 우리가 얻고자 하는 제품과 가장 유사한 모델의 A/S 데이터와 그 제품군에 대한 A/S 데이터로부터 우리는 개략적인 고장률을 계산해 낼 수 있다. 즉 유사모델의 A/S 데이터에 의한 고장률을  $\lambda_{similarity}$ , 해당 제품군에 대한 A/S 데이터에 의한 고장률을  $\lambda_{group}$  이라하면  $\lambda_{product} = w_{p_1} \lambda_{similarity} + w_{p_2} \lambda_{group}$  와 같이  $\lambda_{similarity}$ ,  $\lambda_{group}$  두 제품 불량률의 가중평균이 된다.

한편 시간에 따라 기술이 계속해서 발전하기 때문에 기술 발전에 의한 고장률 만큼을 예측한 전체적인 제품불량률  $\lambda_{product}$ 에서 줄여주어야 한다. 그러므로  $\lambda_{product}$ 를 구할 때와 같은 방법으로  $\lambda_{usual}$ 을 구할 수 있다.

$$\lambda_{usual} = w_{u_1} \lambda_{product} + w_{u_2} \lambda_{technology}$$

그러면 위에서 구한  $\lambda_{usual}$ 과 앞 절에서 구한  $\lambda_{ALT}$ 를 이용하여  $\beta = \lambda_{ALT} / \lambda_{usual}$ 와 같이 쉽게 가속계수를 구할 수 있다.

## 5. 결론 및 추후 연구

현대에 있어서의 경제는 시간과의 전쟁이다. 그러므로 우리가 원하는 정보를 개략적으로나마 빨리 얻을 수 있다는 것은 그만큼 경쟁에 있어서 한발 앞서나갈 수 있음을 의미한다. 그런데 기존의 연구들은 대개가 실험실 데이터와 field 데이터를 별개의 것으로 간주하여 왔다. 이는 분석이 용이하지 않고 또한 실험실 데이터와 field 데이터가 서로 잘 맞지 않는 이유 등에서 비롯되었다고 할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 간단한 알고리즘을 통해 두 데이터를 함께 고려하여 분석함으로써 보다 빨리, 보다 효과적으로 우리가 원하는 정보를 얻을 수 있다. 또한 이 알고리즘은 외삽량을 훨씬 줄일 수 있을 뿐 아니라 비용 및 시간 감소의 효과를 가져올 수도 있다. 그리고 본 연구에서는 제품의 구조 정보와 기술 발전을 고려하여 시간에 대한 불량률의 감소 효과도 동시에 고려하여 양산 단계에 있는 제품뿐만 아니라 아직 출하되지 않은 신제품에 대해서도 가속상태에서의 간단한 실험만 행한다면 쉽게 적용할 수 있다. 하지만 본 연구에서 제시한 세가지 방법에 의한 중앙수명 또한 현실보다 길게 예측하고 있음을 쉽게 알 수 있다. 그러므로 현실데이터를 보다 잘 반영할 수 있는 신뢰도 모형의 개발이 절실하다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 베이지안 기법을 이용한 가속계수의 추정 및 제품 전체 고장률 즉, 시스템 수준의 고장률과 부품 수준간의 고장률과의 관계도 함께 고려한 신뢰도 모형의 개발, 소비자의 행동 패턴을 고려한 신뢰도 모형, 그리고 출하된 제품의 자연 감소 등을 고려한 신뢰도 모형, 수명분포가 Weibull 분포 등 지수분포가 아닐 경우, 데이터에 대한 가정한 지수분포의 적합성 등의 문제가 있다. 또한 모수적/비모수적 방법을 이용한 A/S

데이터의 효과적인 표현 방법 등이 보다 연구되어야 한다.

뿐만 아니라 국내 각 기업에서는 보다 철저한 서비스 맨의 교육, 보다 면밀한 제품 분석, 기술적/비기술적 신뢰성 요인 분석 등 제품기획 단계에서 양산 단계까지 하나의 제품을 생산하기 위한 전 과정에서 기술자 관점이 아닌 소비자 관점에서의 소비자 신뢰성 확보를 위한 다양한 활동들이 전사(全社)차원에서 보다 적극적으로 이루어져야 한다.

\*본 연구는 한국과학재단지정 우수연구센터인 공정산업의 지능자동화연구센터에 의해 부분적으로 지원되었음.

## 6. 참고문헌

1. B.J. Yum, and S.C. Choi, "Optimal design of accelerated life tests under periodic inspection", *Naval Research Logistics*, 36, pp. 779-795, 1989.
2. D. Kececioglu, *Reliability Engineering Handbook* Vol. 1,2, Prentice-Hall International Editions, 1991.
3. D.S. Bai, M.S. Kim, and S.H. Lee, "Optimum simple step-stress accelerated life tests with censoring", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 38, No. 5, pp. 528-532, 1989.
4. D.S. Bai, and S.W. Chung, "Optimal design of partially accelerated life tests for the exponential distributions under type-I censoring", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 41, No. 3, pp. 400-406, 1992.
5. J.D. Kalbfleisch, and J.F. Lawless, "Estimation of reliability in field-performance studies", *Technometrics*, Vol. 30, No. 4, pp. 365-388, 1988.
6. J.F. Lawless, "Statistical methods in reliability", *Technometrics*, Vol. 25, pp. 305-335, 1983.
7. L.A. Escobar, and W.Q. Meeker, "Planning accelerated life tests with type II censoring data", *Journal of Statistical Comp. Simu.*, 23, pp. 273-297, 1986.
8. L.M. Leemis, *Reliability-Probabilistic Models and Statistical Methods*, Prentice-Hall International Editions, 1995.