

특집 : 신뢰성시험설계

전자패키지 신뢰성 예측을 위한 최적 구간중도절단 시험 설계

권대일[†] · 신인선

울산과학기술대학교 인간및시스템공학과

Optimal Interval Censoring Design for Reliability Prediction of Electronic Packages

Daeil Kwon[†] and Insun Shin

UNIST, Department of Human and System Engineering, 50, UNIST-gil, Eonyang-eup, Ulsan-gun, Ulsan 689-798, Korea

(Received June 4, 2015; Corrected June 19, 2015; Accepted June 23, 2015)

Abstract: Qualification includes all activities to demonstrate that a product meets and exceeds the reliability goals. Manufacturers need to spend time and resources for the qualification processes under the pressure of reducing time to market, as well as offering a competitive price. Failure to qualify a product could result in economic loss such as warranty and recall claims and the manufacturer could lose the reputation in the market. In order to provide valid and reliable qualification results, manufacturers are required to make extra effort based on the operational and environmental characteristics of the product. This paper discusses optimal interval censoring design for reliability prediction of electronic packages under limited time and resources. This design should provide more accurate assessment of package capability and thus deliver better reliability prediction.

Keywords: Reliability, Qualification, Interval censoring, Life distributions

1. 서 론

신뢰성 시험은 제품이 사용 환경 속에서 주어진 기능을 얼마나 오래 수행할 수 있는지 평가하고 제품의 수명을 예측하기 위해 수행한다. 전자패키지 생산에 있어서 열 충격, 흡습, 진동 시험 등 다양한 부하 환경에서 신뢰성 시험이 시행되며, 시험에서 얻어진 고장 메커니즘 분석과 고장시간 데이터의 통계적 해석에 기반한 확률분포 추정을 통해 제품의 수명을 예측할 수 있다. 확률분포 추정을 위한 충분한 고장 시간 데이터의 수집이 필요하기 때문에 신뢰성 시험은 품질 시험대비 긴 시간이 소요되어 시험에 따르는 시간 및 비용 또한 상대적으로 크다.

시간 및 비용 측면에서의 효과적인 신뢰성 시험을 위해 구간중도절단을 통한 신뢰성 시험이 이용된다. 구간중도절단 시험은 시험 대상을 지정된 주기에 따라 검사하여 고장시간 데이터를 수집하는 시험 방법이다. 구간중도절단 시험은 간헐적 검사를 통해 시험비용을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면, 정확한 고장시간을 얻는 연속적인 검사에 비해 불확실성이 존재한다는 단점이 있다. 따라서, 중도절단된 데이터를 이용한 제품 수명분포의 통

계적 추정의 신뢰도는 검사방법에 따라 영향을 받는다. 추정 신뢰도를 결정하는 요소의 예로는 각 검사 당 표본 수, 검사 횟수, 검사 간격 등이 있다. 제시된 수명분포의 추정 신뢰도를 만족시키기 위해 적정 수준의 표본 수와 검사 횟수를 갖는 시험계획이 필요하다.

구간 중도절단 시험계획에 관하여 다양한 분야에서 연구가 수행되어왔다. Meeker는 수명이 와이블 분포를 따르고 최종 검사 시간을 가정한 후, 검사간격 변화에 따른 추정 수명과 실제 수명과의 비교를 통해 수명 예측의 정확도를 비교하고 지정된 추정 신뢰도를 만족하는 표본 수에 대해 가이드라인을 제시하였다.¹⁾ Huang *et al.*은 수명이 지수 분포를 따른다고 가정한 후, 설치비용, 시료비용, 검사비용, 운영비용을 정량화하여 시험 시행에 소요되는 총 비용을 최소화 시키는 최적 표본 수, 검사 횟수, 검사 간격에 대해 연구하였다.²⁾ Kwak *et al.*은 수명이 와이블 분포를 따르고 고장 데이터가 구간중도절단 된 형태를 가질 때 최대 우도법과 최소 제곱법을 이용한 모수 추정의 정확도를 비교하였다.³⁾ Shin *et al.*은 Ni-W-P 합금피막에서 W함량 변화에 따른 Ni₃P 금속간 화합물의 형성 및 분포를 분석하기 위해 구간중도절단 시험을 시행하여 솔더

[†]Corresponding author
E-mail: dkwon@unist.ac.kr

© 2015, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

접합부의 단면조직을 관찰하고 도금층 계면 신뢰성에 대해 연구하였다.⁴⁾

이 논문에서는 구간중도절단 시험에서 검사간격 변화가 수명분포 모수 추정에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 연구하였다. 중도절단 된 고장 데이터를 이용하여 모수에 따라 다양한 수명분포 형태를 나타낼 수 있는 와이블 확률분포를 추정하고 그 추정 정확도를 비교하였다. 추정 정확도 비교를 통해 수명분포를 추정하기 위한 최적의 구간중도절단 검사 간격을 도출하였다.

2. 구간중도절단 데이터

신뢰성 시험에서 얻을 수 있는 고장 데이터의 종류로 고장시간이 명확한 데이터(exact data)와 중도절단 데이터(censored data)가 있다. 고장에 대한 연속적인 감사가 가능한 경우 고장시간을 명확하게 알 수 있는 반면, 간헐적 감사가 이루어지는 경우에는 명확한 고장시간을 알 수 없다. 중도절단 데이터는 감시시간과 각 감시 사이에 발생한 고장 빈도수를 이용하여 표현하며 구간중도절단 데이터라 부른다. 구간중도절단 데이터의 특별한 경우로 우중도절단 데이터(right censored data)가 있으며 이는 마지막 검사에서도 고장이 발견되지 않은 경우를 의미한다.

구간중도절단 데이터를 이용한 고장 확률분포의 모수 결정과 신뢰성 예측은 명확한 데이터를 이용한 결과 대비 불확정성이 크게 나타나며 검사시간, 검사간격 등 중도절단 방법에 따라 영향을 받는다. 신뢰성 시험의 많은 경우 등시간간격(equal space in time)의 중도절단 방법이 사용된다. 등시간간격은 여러 시험이 동시에 진행되는 경우 검사의 효율성을 높일 수 있다는 장점이 있으나, 경우에 따라 신뢰성 예측의 불확정성이 커질 수 있다는 단점이 있다. 예를 들어, Fig. 2(a)와 같이 검사간격이 적절히 배치된 경우 구간중도절단 데이터를 이용하여 시험 대상의 고장 확률분포를 잘 표현할 수 있지만 Fig. 2(b)와 같이 검사간격이 고장 확률분포의 특성을 반영하지 못하는 경우 시험 대상의 정확한 신뢰성 예측이 어려울 수도 있다.

제한된 시간과 자원을 가지고 수행하는 신뢰성 시험에 있어 시험데이터의 최적 취득체계 설계를 위해 본 연구에서는 등확률간격(equal space in probability) 구간중도절단 방법을 제안한다(Fig. 3). 등확률간격은 각 검사구간의 고장확률이 일정하도록 검사시간을 배치하는 방법으로 고장 확률분포의 특성 파악에 용이하다. 이 논문에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 등시간간격과 등확률간격 구간중도절단 시험 결과를 얻고 각각의 경우에 대

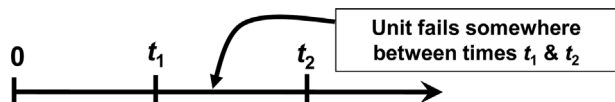


Fig. 1. 구간중도절단 데이터 예시.

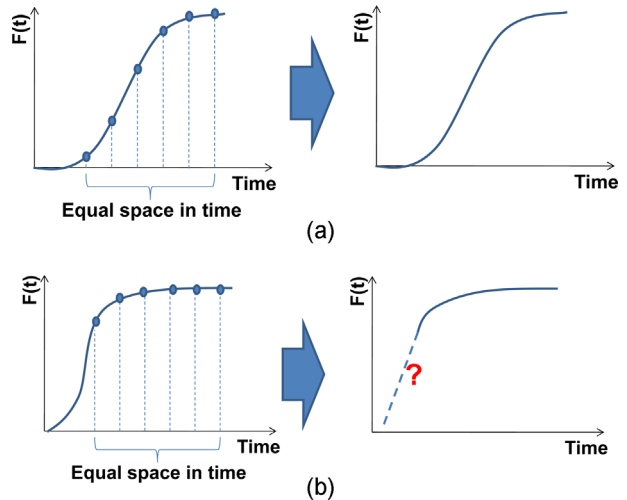


Fig. 2. 등시간간격 구간중도절단 데이터를 이용한 수명분포 예측.

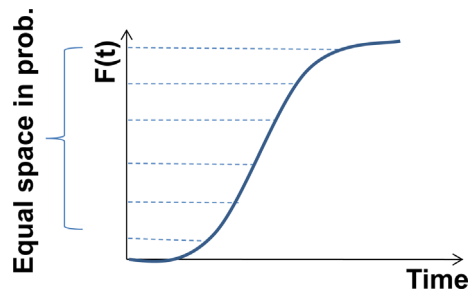


Fig. 3. 등확률간격 구간중도절단 데이터를 이용한 수명분포 예측.

해 주어진 고장 확률분포 모수 값과 예측 값을 비교하여 신뢰성 예측 성능을 검증하였다.

3. 실험방법

이 논문에서는 고장시간 데이터가 2-파라미터 와이블 확률분포를 따른다는 가정을 바탕으로 등시간간격과 등확률간격의 구간중도절단 방법 별로 형상모수, 척도모수를 예측하는 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 전자 패키지의 열사이클 시험에서 얻을 수 있는 형상모수와 척도모수를 가정하여 형상모수는 1~15, 척도모수는 1000~3000로 범위를 정하였다. 주어진 형상모수와 척도모수를 이용하여 등확률간격의 검사시간과 검사간격을 결정하였다. 등시간간격의 경우 비교를 위해 매 300시간, 매 400시간의 두 가지 경우를 사용하였다. 검사 횟수는 시험당 6회로 제한을 두었으며 각 검사에 사용된 샘플은 50개로 동일하게 설정하였다.

각 검사시간에 발생하는 고장 빈도수를 확률변수로 설정하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 6회 검사를 마친 이후 각 고장시간별 고장 빈도수를 기준으로 2-파라미터 와이블 분포함수의 형상모수와 척도모수를 예측하였다. 주어진 형상모수, 척도모수와 예측한 값들의 비교를 통해 구간중도절단 방법들의 신뢰성 예측 성능을

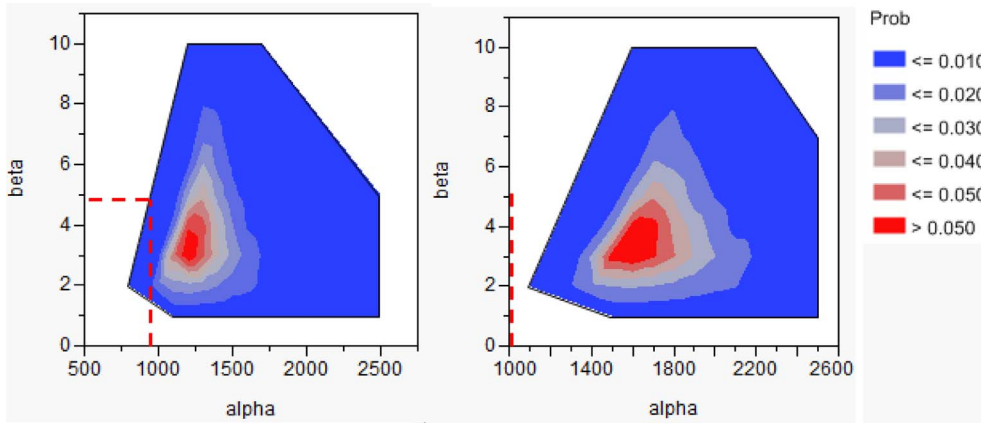


Fig. 4. 등시간간격 구간 중도절단 데이터를 이용한 와이블 모수 예측 결과.

평가하였다.

4. 연구결과

Fig. 4는 등시간간격을 이용한 구간중도절단 시험의 몬테카를로 시뮬레이션 수행 결과를 보여준다. 결과의 x축, y축은 각각 척도모수(alpha), 형상모수(beta)를 나타낸다. 시뮬레이션에 사용된 척도모수는 1000시간, 형상모수는 5로 설정하였다. 검사에서 검출된 고장 빈도수 각각의 경우에 따라 척도모수와 형상모수를 예측한 결과를 등

고선 선도로 나타냈다. 등고선 선도가 붉은색에 가까울수록 예측 빈도가 높아 해당 모수를 예측하기 수월함을 나타낸다. Fig. 4의 첫 번째는 매 300시간마다 총 6회 검사를 시행한 경우에 대한 결과이고 두 번째는 매 400시간마다 총 6회 검사를 시행한 경우에 대한 결과이다. 주어진 척도모수와 형상모수의 조합은 각각의 그래프에 붉은 파선으로 표시하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면 등시간간격을 이용한 두 방법 모두 주어진 척도모수와 형상모수를 예측하는데 적절하지 못함을 알 수 있다. 특히 매 400시간마다 검사를 실시하는 경우 주어진 모수 조합

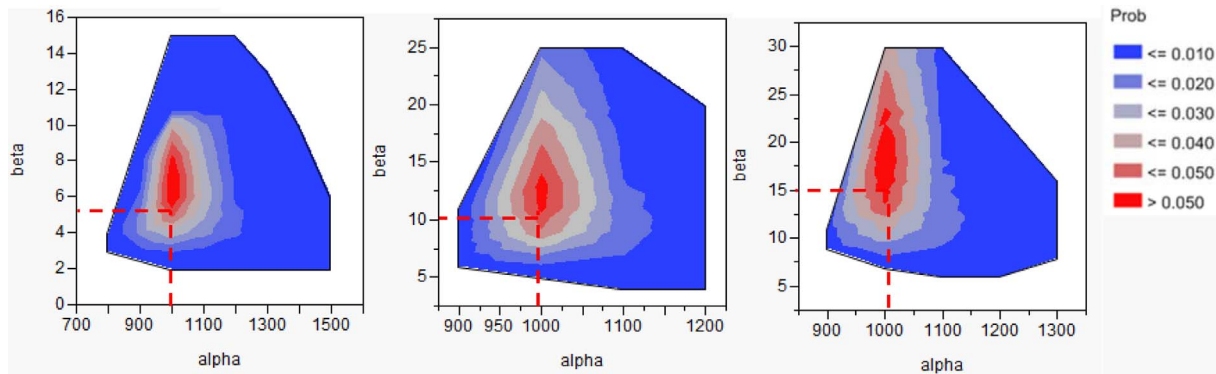


Fig. 5. 등확률간격 구간 중도절단 데이터를 이용한 와이블 모수 예측 결과(척도모수=1000).

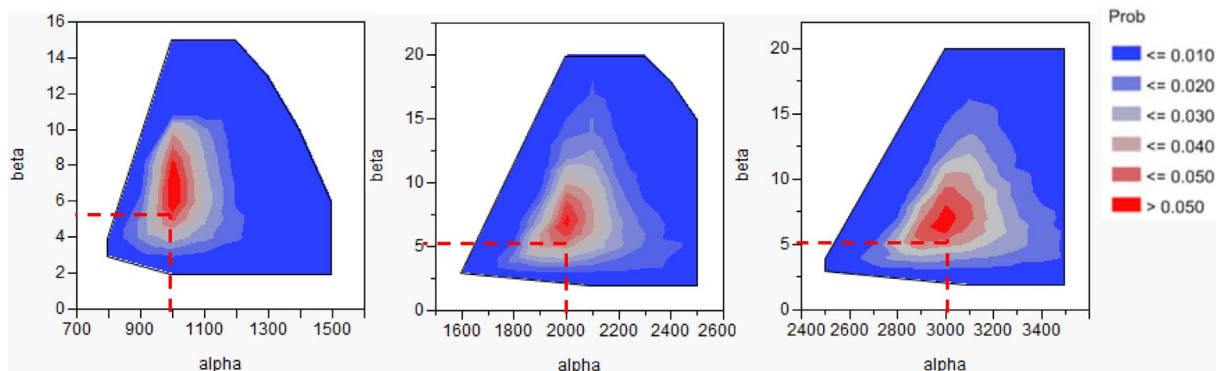


Fig. 6. 등확률간격 구간 중도절단 데이터를 이용한 와이블 모수 예측 결과(형상모수=5).

의 예측이 불가능하였다. 따라서 등시간간격을 이용한 구간중도절단 시험은 시험대상에 따라 정확한 신뢰성 평가 및 예측이 불가능할 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 등확률간격을 이용한 구간중도절단 시험의 몬테카를로 시뮬레이션 수행 결과를 보여준다. 누적고장확률기준 0%부터 100%까지 균일하게 나눠 총 6회 검사를 시행하였다. Fig. 5는 척도모수를 1000으로 고정하고 형상모수를 5, 10, 15의 총 세가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타내고 Fig. 6은 형상모수를 5로 고정하고 척도모수를 1000, 2000, 3000의 총 세가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타낸다. 결과로 얻은 척도모수와 형상모수의 조합은 등고선 선도를 이용하여 표현하였다. 등시간간격 결과에서와 마찬가지로 각각 주어진 척도모수와 형상모수의 조합을 붉은 파선으로 표시하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면 등확률분포 이용시 주어진 형상모수와 척도모수의 다양한 조합을 성공적으로 예측할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 구간중도절단 검사 간격이 와이블 수명분포 모수의 추정에 미치는 영향을 분석하고, 보다 정확한 신뢰성 예측을 위한 등확률간격 구간중도절단 검사 간격을 제안하였다. 고장시간은 2-파라미터 와이블 수명분포를 가정한 후, 주어진 수명분포의 모수 대비 구간중도절단 방법에 따라 예측한 수명분포 모수의 비교를 통해 신뢰성 예측성능을 비교하였다. 등시간간격을 이용한 구간중도절단 방법은 경우에 따라 형상모수와 척도모수의 조합을 예측하지 못하는 문제점을 보였으나, 같은 조건에서 등확률간격을 이용한 구간중도절단 방법은 다양한 조합을 성공적으로 예측하였다.

다양한 고장시간의 확률분포에 유연하게 대처할 수 있는 등확률간격 구간중도절단 방법은 최적의 신뢰성 예측성능을 보여주기 위해 기존 고장데이터와 같은 사전자료가 필요하다. 예를 들어, 비슷한 설계를 가진 시험 대상을 찾아 이들의 신뢰성 평가 결과를 바탕으로 등확률간격 구간중도절단 시험을 설계할 수 있다. 기존 고장데이터를 확보하기 어려운 경우에는 시험 대상 중 일부 표본의 실시간 고장감시를 통해 각 감시 사이의 고장확률이 같도록 구간중도절단 시험을 설계하는 것이 가능하다. 최적화된 구간중도절단 방법을 이용한 신뢰성 평가를 통해 전자부품 소재 및 제품 신뢰성 시험에서 시간과 비용

을 효과적으로 줄일 수 있을 것이다.

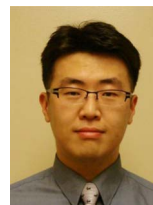
구간중도절단 시험의 최적 감시 횟수 및 표본 수 결정에 대한 관련 연구주제를 통해 수명분포 모수 예측, 궁극적으로 신뢰성 예측의 정확도를 높이는 연구를 계획하고 있으며 향후 실제 신뢰성 시험에 적용하여 시험 시간 및 비용 절감을 정량적으로 평가 할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2014R1A1A1003653)

References

1. W. Q. Meeker, "Planning life tests in which units are inspected for failure", *IEEE Transactions on Reliability*, 35(5), 571 (1986).
2. S. R. Huang and S. J. Wu, "Reliability Sampling Plans Under Progressive Type-I Interval Censoring Using Cost Functions", *IEEE Transactions on Reliability*, 57(3), 445 (2008).
3. D. H. Kwak and S. B. Kim, "Comparison of Parameter Estimation Methods for Weibull Distribution Using Interval Censored Data", *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 102 (2013).
4. D. H. Shin, J. K. Cho and S. G. Kang, "Study on Thermal Stability of the Interface between Electroless Ni-W-P Deposits and BGA Lead-Free Solder (Sn-3.0Ag-0.5Cu)", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 17(1), 25 (2010).



- 권대일(權大日)
- UNIST, 인간 및 시스템 공학과
- 전자패키징, 고장예측, 신뢰성
- e-mail: dkwon@unist.ac.kr



- 신인선(申仁仙)
- UNIST, 인간 및 시스템 공학과
- 신뢰성평가, 고장예지
- e-mail: ishin@unist.ac.kr